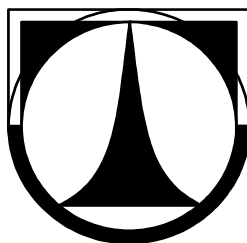


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



Disertační práce

Monitorizace tlakových procesů kaskádového vstřikování u
velkorozměrových nástrojů

2012

Ing. Michal Lukeš

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

Obor 23-03V Strojírenská technologie

zaměření
Zpracování plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Monitorizace tlakových procesů kaskádového vstřikování u
velkorozměrových nástrojů

**Pressure processes monitoring of cascade injection at
the large scale moulds**

Ing. Michal Lukeš

Školitel: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	124
Počet obrázků:	112
Počet tabulek:	12
Počet příloh:	7

Anotace

Téma práce: Monitorizace tlakových procesů kaskádového vstřikování u velkorozměrových nástrojů

Disertační práce je zaměřena na výzkum nejvhodnějšího procesního pole při vstřikování velkorozměrových dílů v závislosti na počtu plnicích míst, době dotlaku a velikosti dotlaku s důrazem na výslednou kvalitu vyráběného dílu. Teoretická část disertační práce obsahuje rozbor procesu vstřikování včetně zohlednění vlivů významných technologických parametrů na průběh tlaku v dutině nástroje. Dále je zde uvedeno porovnání způsobů řízení vstřikovacího procesu a kapitola věnovaná problematice zpracování naměřených dat. Experimentální část je zaměřena na monitorizaci tlakových procesů s následným vyhodnocením vlivu vybraných technologických parametrů na velikost výsledné procesní plochy pro výrobu dobrého dílu. Dále jsou analyzovány způsoby přepínání na dotlakovou fázi a jejich vliv na výslednou stabilitu procesu. V experimentální části je také evaluováno úplné řízení uzavíratelných trysek ve fázi vstřiku pomocí tlaků uvnitř dutiny nástroje. Připojené softwarové simulace se zabývají také optimálním počtem uzavíratelných trysek pro velkorozměrový nástroj tohoto typu.

Klíčová slova: Monitorizace tlakových procesů, tlak v dutině nástroje, plocha procesního pole

Annotation

Theme of dissertation: Pressure processes monitoring of cascade injection at the large scale moulds

The dissertation work is focused on the most convenient process field research of cascade injection at the large scale parts according to the number of valve gates, holding pressure and holding time with accent on the part quality. The theoretical part of the dissertation contains the description of the filling process including significant technological parameters influence on cavity pressure profile. Then there is mentioned comparison of different ways of injection process controlling and one chapter is dedicated to the way of processing of the measured data. The experimental part is focused on pressure processes monitoring with evaluation of significant technological parameters influence on process field area of the good parts occurrence. At the same time there are analysed stroke dependent change-over and cavity pressure dependent change-over for holding pressure according to the process stability. Cavity pressure dependent valve gate control during the filling stage were also evaluated. The experimental part also contains the software simulations focused on optimal number of valve gates at large scale moulds.

Keywords: Pressure processes monitoring, Cavity pressure, Process field area

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací.

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my dissertation in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my dissertation for the internal purposes of TUL.

If I use my dissertation or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my dissertation to the full amount.

I compiled the dissertation on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultations.

Datum / Date: 12.1.2012

Podpis / Signature :

Poděkování:

Chtěl bych tímto poděkovat vedení i zainteresovaným zaměstnancům společnosti Magna Exteriors & Interiors (Bohemia) s.r.o. za vstřícnost a porozumění při realizaci experimentální části disertační práce.

Současně chci poděkovat panu Petru Starůstkovi z fy Kistler za spolupráci a podporu během experimentálních měření.

Dále bych velmi rád poděkoval panu prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi za cenné rady a připomínky jak v průběhu mého studia, tak i při realizaci disertační práce.

V neposlední řadě patří velké poděkování také mé rodině za podporu při plnění časově náročných pracovních úkolů plynoucích z mého povolání, ale i za podporu během studia a tvorby disertační práce.



OBSAH

1 Úvod.....	12
1.1 Cíle disertační práce	13
2 TEORETICKÁ ČÁST	14
2.1 Technologie vstřikování	14
2.2 Reologické vlastnosti tavenin plastů.....	16
2.2.1 Viskoelastická polymerních tavenin.....	20
2.3 Průběhy tlaků u vstřikovacího procesu.....	21
2.3.1 Způsoby měření tlaku.....	22
2.3.2 Poloha snímače tlaku v dutině nástroje	25
2.4 Diagram p-v-T	27
2.4.1 Vstřikovací cyklus v diagramu p-v-T	30
2.4.2 Vstřikovací cyklus ve 3-D diagramu p-v-T.....	31
2.4.3 Průběh tlaku v dutině nástroje	32
2.5 Řízení vstřikovacího procesu	39
2.5.1 Vliv viskozity taveniny na rychlost pohybu šneku.....	41
2.5.2 Vliv kolísání času vstřiku na tlak v dutině nástroje	41
2.5.3 Způsob přepnutí na dotlak a jeho vliv na kolísání hmotnosti vyr. dílu	42
2.5.4 Řízení vstřikovacího procesu pomocí uzavřené a otevřené smyčky	43
2.6. Vstřikovací nástroje.....	45
2.7. Kaskádové vstřikování	46
2.8 Problematika zpracování naměřených dat	49
2.8.1 Aproximace naměřených dat formou funkce	49
2.8.2 Výpočet plochy pod křivkou.....	50
2.9 Hodnocení způsobilosti procesu a analýza rozptylu	52
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	55
3.1 Charakteristika použitého materiálu	55
3.2 Vstřikovací nástroj.....	57
3.3 Vstřikovací stroj.....	60
3.3.1. Úpravy vstřikovacího stroje	61
3.4. CoMo jednotka.....	63
3.5. Nastavení technologických parametrů na stroji při monitorizaci kaskádového vstřikování.....	64
3.5.1. Nastavení technologických parametrů pro řízení uzavíratelných trysek vyhřívaného vtokového systému	67



3.6. Nastavení technologických parametrů na stroji a jednotce CoMo při tlakovém řízení vstřikovacího procesu.....	68
3.6.1. Nastavení technologických parametrů pro řízení uzavíratelných trysek vyhřívaného vtokového systému jednotkou CoMo	69
3.7. Proces měření.....	71
3.7.1. Monitorizace kaskádového vstřikování	72
3.7.2. Analýza získaných dat během monitorizace	74
3.7.3. Kvalitativní vyhodnocení.....	78
3.7.4. Regresní analýza vybraných tlakových průběhů.....	83
3.7.5. Vliv dotlaku a vliv počtu trysek na výslednou tloušťku stěny	91
3.7.6. Hodnocení pevnosti ve střihu	95
3.7.7. Analýza způsobilosti vstřikovacího procesu krátkodobou zkouškou pro varianty přepínání na dotlak	97
3.7.8. Tlakové řízení vstřikovacího procesu pomocí jednotky CoMo	100
3.8. Softwarové simulace vstřikování velkorozměrového dílu.....	103
3.9 Diskuze výsledků experimentálního měření	112
4 ZÁVĚR.....	118
Přínos pro vědu.....	119
Přínos pro praxi.....	119
5 Seznam použité literatury.....	121
6 Seznam publikací.....	123
7 Seznam příloh.....	124

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

C_m	index způsobilosti strojního zařízení
C_{mk}	kritický index způsobilosti strojního zařízení
C_{mL}	dolní index způsobilosti strojního zařízení
C_{mU}	horní index způsobilosti strojního zařízení
C_p	index způsobilosti procesu
C_{pk}	kritický index způsobilosti procesu
C_{pL}	dolní index způsobilosti procesu
C_{pU}	horní index způsobilosti procesu
$C(t)$	krípková funkce
E	aktivační energie viskózního toku [$J \cdot mol^{-1}$]
E_D	dynamický modul pružnosti [MPa]
F	smyková síla [N]
h	tloušťka vrstvy tekoucí taveniny plastu [m]
$j(t)$	funkce poddajnosti
k	Bagleyho korekce
l	délka kapiláry [mm]
LSL	dolní toleranční mez
m	exponent mocninového zákona
MFR	hmotnostní index toku taveniny termoplastů [g/10 min]
n_t	počet uzavíratelných trysek vstřikovacího nástroje [ks]
p	tlak [bar], [MPa]
p_c	tlakový rozdíl [MPa]
$p_{\check{c}}$	tlak před čelem šneku ve vstřikovací jednotce [bar]
p_d	velikost dotlaku [bar]
p_e	tlak potřebný pro překonání elastického odporu taveniny [MPa]
p_{f1}	tlak v dutině formy v místě 1 [bar]
p_{f2}	tlak v dutině formy v místě 2 [bar]
p_i	tlak v dutině formy [bar], [MPa]
p_s	systémový tlak [bar]
p_v	tlak ve vtokovém systému nástroje [bar]
p_q	tlak potřebný pro překonání viskózních odporů taveniny [MPa]



r	průměr kapiláry [mm]
R_m	materiálová konstanta analogická plynové konstantě [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
S	smyková plocha [m^2]
s	dráha [mm]
s_K	poloha šneku [mm]
s_N	poloha nástroje [mm]
S_{pp}	průměrný obsah procesní plochy
t	čas [s]
t_d	doba dotlakové fáze [s]
t_{ch}	doba chlazení [s]
t_m	doba manipulace [s]
t_{pl}	doba plastikace [s]
t_{s1}	strojní čas pro uzavření formy [s]
t_{s2}	strojní čas pro přisunutí plastikační jednotky [s]
t_{s3}	strojní čas pro otevření formy [s]
t_v	doba vstřikovací fáze [s]
T	teplota [$^{\circ}\text{C}$], [K]
T_f	teplota formy [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{př}$	přechodová teplota plastu polymeru [K]
T_t	teplota taveniny [$^{\circ}\text{C}$]
USL	horní toleranční mez
v	měrný objem [$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$], [$\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$]
v_p	rychlost pohybu krajní vrstvy taveniny [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v_{st}	střížná rychlost [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]
\bar{x}	aritmetický průměr hodnot
Φ	koeficient tekutosti [s^{-1}]
$\dot{\gamma}$	smyková rychlost [s^{-1}]
η	dynamická viskozita taveniny [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
η_0	dynamická viskozita při $T = 0\text{K}$ [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
η_N	newtonská viskozita [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
η_{∞}	viskozita při nekonečném smyku [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
η_{zd}	zdánlivá viskozita [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
π	vnitřní tlak ve hmotě [MPa]



σ_S	směrodatná odchylka základního souboru
τ	smykové napětí [Pa]
τ_{re}	relaxační doba [s]
τ_s	pevnost materiálu ve stříhu [MPa]
ω	měrný objem polymeru při 0 K [m ³ ·kg ⁻¹]

1 ÚVOD

Pravděpodobně nejrozšířenějším způsobem zpracování polymerních materiálů je v současnosti technologie vstřikování a to i díky stále výraznějšímu pronikání termoplastických materiálů do všech odvětví působnosti člověka.

V současné době je kladen čím dál větší důraz na zkvalitňování a zefektivňování výroby, což s sebou přináší potřebu neustálého sledování nových trendů, vývoj nových technologií nebo inovaci stávajících, ať už postihujících samotnou technologii vstřikování či zabývajících se zlepšením řízení a vyšším stupněm automatizace výroby za účelem zvýšení stability výrobních procesů resp. snížením jejich zmetkovitosti. Takovým příkladem může být regulace tlaku taveniny pro jednotlivé uzavíratelné trysky vtokového systému známá jako Dynamic Feed od firmy Synventive Molding Solutions, GmbH nebo systém firmy Ewikon, který řídí polohy jehel jednotlivých uzavíratelných trysek pomocí krokových motorů. Na eliminaci vzhledových vad způsobených postupným otevíráním trysek při kaskádovém vstřikování je zaměřen systém redukčních ventilů nazvaný Softgate od firmy Incoe. Firma Kistler zase připravila systém Multiflow propojený s jednotkou CoMo, který je primárně určen pro vícenásobné nástroje a je založen na balancování jednotlivých otisků pomocí regulace teplot trysek resp. celého horkého rozvodu. Dále je třeba zmínit také systém vstřikování taveniny s protitlakem zaměřený zejména na kvalitu povrchu při vstřikování termoplastů s nadouvadly připravený firmou Engel a IKV. Samozřejmě nelze opomenout systém Intellimold firmy MGV Enterprises, zajišťující monitorizaci a adaptivní řízení procesu vstřikování tak, aby bylo dosaženo co možná nejrovnoměrnějšího rozložení tlaků uvnitř nástroje, což vede k minimalizaci vnitřních pnutí ve výstřiku a zvýšena je i kvalita povrchu výrobku.

Výrobci materiálů uvádějí na trh nové produkty, které vynikají stále lepšími mechanickými vlastnostmi a mají zároveň vylepšené zpracovatelské podmínky, což mohou reprezentovat např. nové druhy termoplastických materiálů, zejména však PP s vysokou hodnotou MFR. Nebo vyvíjí dnes stále žádanější produkty označované jako bioplasty či kompozity obsahující tzv. natur fáze.

Pro výrobu kvalitních a stále složitějších výstřiků je nutná také dokonalá znalost nejen tlakových procesů při vstřikování, ale i tepelných dějů v systému výstřik – nástroj.

V praxi se navrhuje stále ještě vstřikovací formy ve velké míře jen na základě zkušeností konstruktéra a technologa. U tvarově složitějších výstřiků však takovéto návrhy nemusí být vždy optimální. Proto se v dnešní době mnohem častěji uplatňují simulační programy (např. Moldflow, Cadmould), na jejichž základě můžeme sledovat tepelné a tlakové děje ve virtuálních vstřikovacích formách, odhalit některé druhy vad výstřiku ještě před vyrobením nástroje, či navrhnout co možná neoptimálnější vtokový a temperační systém formy. To se samozřejmě pozitivně odráží na vývoji nových výrobků, nástrojů pro vstřikování a v neposlední řadě i na kvalitě a produktivitě výroby.

1.1 Cíle disertační práce

V současné době není publikována odborná literatura zabývající se komplexně problematikou monitorizace tlakových procesů kaskádového vstřikování velkorozměrových dílů. Cílem disertační práce je výzkum nejvhodnějšího procesního pole pro vstřikování velkorozměrových dílů v závislosti na počtu plnicích míst, době a velikosti dotlaku s důrazem na výslednou kvalitu dílu. Dané téma je rozčleněno do těchto dílčích etap.

1. Popis možností ovlivnění procesu vstřikování u velkorozměrových nástrojů vč. rozboru způsobů měření tlaku uvnitř nástroje a metod řízení vstřikovacího procesu.
2. Monitorizace tlakových procesů pro vybrané technologické parametry, které významně ovlivňují průběh vnitřního tlaku v dutině nástroje během vstřikování resp. výslednou kvalitu vyráběného dílu.
3. Z naměřených tlakových křivek stanovit přechodové křivky vymezující oblast nastavení daného parametru pro vyrobení dobrého dílu resp. ohraničení oblastí s výskytem zástříků a oblastí s výskytem propadlin.
4. Vyhodnocení všech proměnných v závislosti na velikosti získaných procesních ploch a stanovení významnosti jednotlivých parametrů při zohlednění kvalitativního hlediska.
5. Vyhodnotit korelaci simulací s experimenty a následně provést simulace za účelem stanovení neoptimálnějšího počtu plnicích míst.

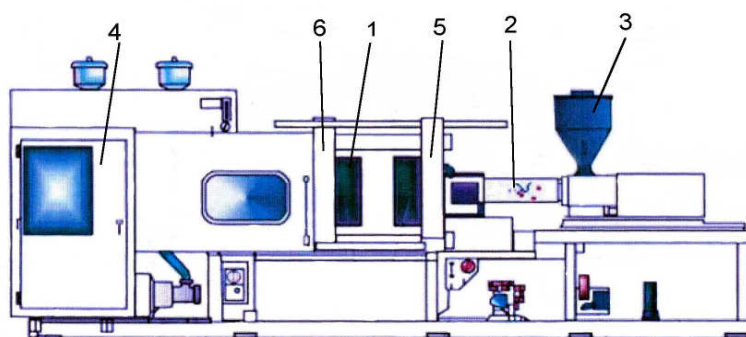
Výsledky simulací spolu s výsledky experimentálních měření budou sloužit jako obecná doporučení pro konstrukci a provoz nástrojů pro vstřikování velkorozměrových výrobků tohoto typu.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Technologie vstřikování /2/, /3/, /4/, /6/

Výrobky zhotovené vstřikováním se vyznačují velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností a vysokou reprodukovatelností mechanických i fyzikálních vlastností. Tvar výrobků může být značně jednoduchý, ale také velice složitý.

Moderní vstřikovací stroje jsou již většinou plně automatizovány, takže dosahují vysoké produktivity práce. Vstřikovací nástroje navíc dosahují vysokého stupně využití materiálu, který se často blíží 100%, čímž splňují požadavky na bezodpadovou technologii.

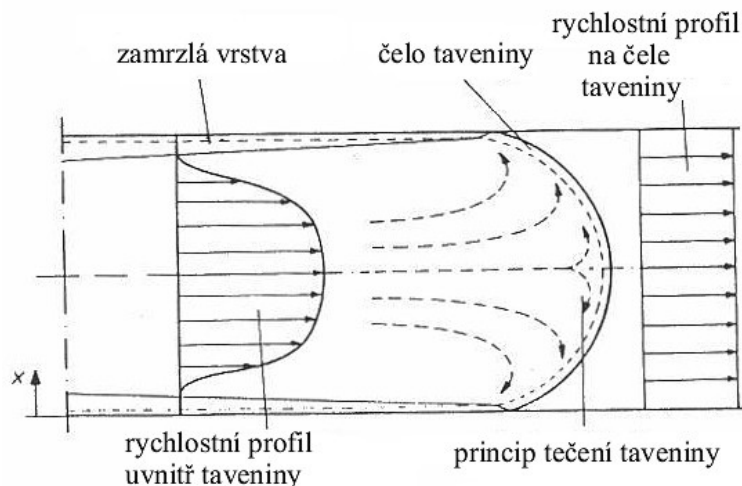


1-nástroj, 2-válec se
šnekem, 3-násypka,
4-řídící jednotka,
5-pevná deska,
6-pohyblivá deska

Obr. 1: Schéma vstřikovacího lisu /2/

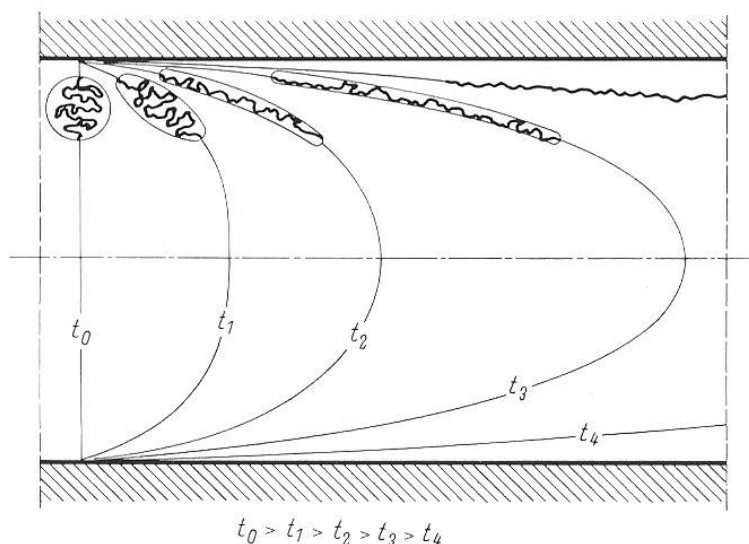
Vstřikování je proces diskontinuální a cyklický, který má uplatnění ve velkosériové a hromadné výrobě. Vyznačuje se poměrně složitým fyzikálním procesem, na kterém se podílí polymer, vstřikovací stroj a nástroj. Vstřikováním rozumíme způsob tváření, při kterém je dávka roztaveného plastu z plastikační jednotky vstříknuta axiálním pohybem šneku do uzavřené dutiny formy.

Při postupném plnění dutiny vstřikovacího nástroje laminárním tokem dochází k zakřivení čela taveniny v důsledku poklesu rychlosti plnění a tlaku směrem od středu výrobku k jeho stěnám (viz obr.2). To je dáno rozdílem viskozity, kdy směrem ke stěně nástroje viskozita stoupá v důsledku rychlejšího chladnutí taveniny. Oproti tomu směrem ke středu výrobku viskozita klesá a vzniká zde plastické jádro, které umožňuje další průtok taveniny do dutiny nástroje a je potřebné pro průběh dotlakové fáze.



Obr. 2: Plnění dutiny nástroje /13/

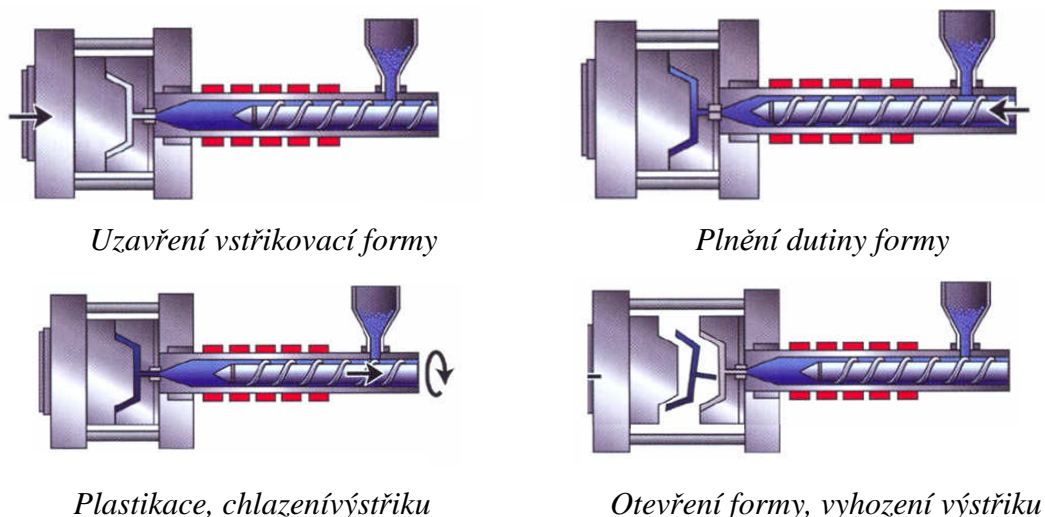
Z chronologického hlediska můžeme proces plnění dutiny nástroje rozdělit na fázi vstřikovací a dotlakovou. Vstřikovací fáze by měla být co nejkratší, jelikož tavenina při styku se stěnou nástroje tuhne, stoupá viskozita taveniny a s postupem času se zužuje šířka plastického jádra potřebného také pro dotlakovou fázi. Naproti tomu příliš rychlé plnění dutiny nástroje může vést k výrazné orientaci makromolekul a ke vzniku vnitřních pnutí jejichž projevem mohou být nežádoucí deformace výrobku.



Obr. 3: Orientace makromolekul v závislosti na době vstřiku /13/

Dotlakem působíme na materiál, abychom částečně kompenzovali zbytková pnutí, ale také smrštění výrobku. Zároveň je dotlaková fáze nejdůležitější částí vstřikovacího cyklu z hlediska výsledné kvality povrchu vyráběného dílu.

Od okamžiku plnění nastává v důsledku styku materiálu se stěnou nástroje chlazení výrobku až do otevření nástroje a vyjmutí výrobku. V praxi se dělí na dobu chlazení při plném vstřikovacím tlaku a při klesajícím tlaku. Hmotu předává do nástroje teplo a ochlazováním ztuhne ve finální výrobek, který nazýváme výstřík. Poté se nástroj otevře, výstřík je vyhozen z nástroje a celý cyklus se opakuje. Nejčastěji se tímto způsobem zpracovávají termoplasty.

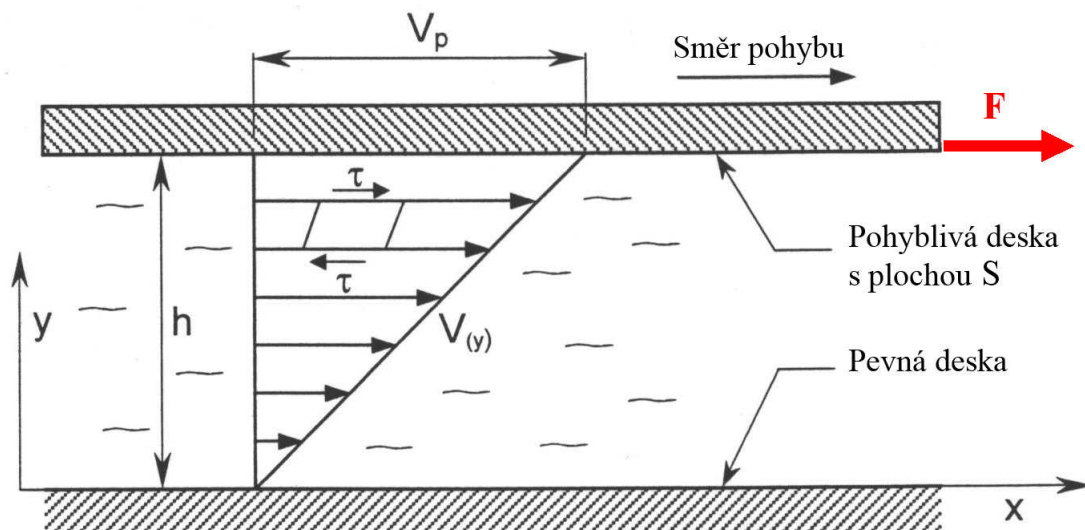


Obr. 4: Schéma průběhu vstřikovacího cyklu /13/

2.2 Reologické vlastnosti tavenin plastů /8/,/13/

Reologie neboli nauka o toku se zabývá vztahem mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí. Během plastikace se plast převede do viskózně tekutého stavu, zároveň se stoupající teplotou taveniny T_t klesá viskozita taveniny plastu. V důsledku poklesu viskozity η klesá během toku taveniny její vnitřní odpor. Dále jsou tokové vlastnosti tavenin plastů ovlivněny také smykovou rychlostí $\dot{\gamma}$ a tlakem taveniny p .

Viskózní tok taveniny se smykovou rychlostí $\dot{\gamma}$ a smykovým napětím τ je výsledkem přilnutí taveniny ke stěně nástroje a následným smýkáním jednotlivých vrstev v průřezu tloušťky stěny. Pro daný případ viskózního toku (viz obr.5) vzrůstá rychlost toku taveniny lineárně s rostoucí tloušťkou vrstvy tekoucí taveniny při konstantní smykové rychlosti i napětí.



Obr. 5: Viskózní tok /13/

Smykovou rychlost můžeme vyjádřit jako:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} = \frac{v_p}{h} \quad (1)$$

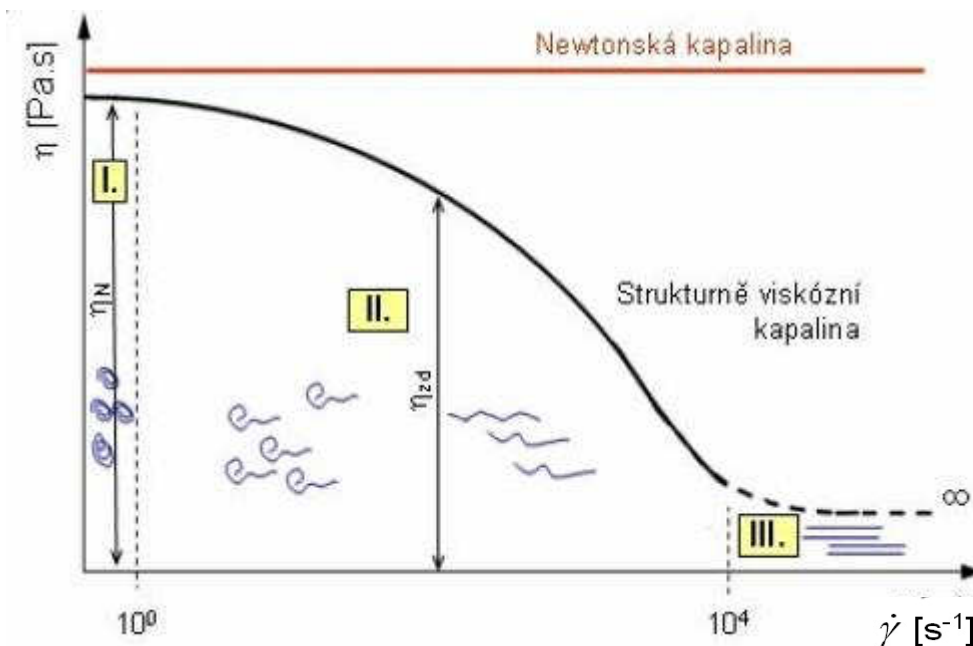
Vztah pro výpočet smykového napětí:

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (2)$$

Newtonův zákon, který je platný pro laminární tok nízkomolekulárních kapalin, popisuje závislost mezi smykovou rychlostí a smykovým napětím. Dynamická viskozita je pro ideální newtonskou kapalinu při konstantní teplotě nezávislá na smykové rychlosti.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

Taveniny plastů řadíme však k nenewtonským kapalinám. Jejich viskozita klesá se zvyšujícím se smykovým napětím a takové kapaliny nazýváme strukturně viskózní nebo také pseudoplastické. Výše popsanou závislost můžeme pro velmi široký rozsah smykových rychlostí vyjádřit graficky (viz obr.6) a zároveň na křivce odlišit 3 oblasti.



Obr. 6. Závislost dynamické viskozity tavenin polymerů na smykové rychlosti /20/

Při velmi malých smykových rychlostech, asi do $\dot{\gamma}=1\text{s}^{-1}$, viskozita na smykové rychlosti nezávisí. Je to oblast takzvané maximální newtonské viskozity η_N , kdy makromolekuly zaujímají tvar volně sbalených klubíček a přemísťují se jako celky (viz oblast I). Při dalším zvýšení smykové rychlosti viskozita klesá a její hodnota je dána podílem aktuálních hodnot smykového napětí τ a smykové rychlosti $\dot{\gamma}$. Dochází k rozvinování klubíček ve směru toku. Makromolekuly se snadněji pohybují a nacházíme se v oblasti II, kde je viskozita označována jako zdánlivá η_{zd} . Při velmi vysokých smykových rychlostech by se stala viskozita opět nezávislou na smykové rychlosti (viz oblast III). Tato se nazývá viskozita při nekonečném smyku a značí se η_{∞} . V tomto případě by došlo k dokonalému rozbalení všech makromolekul, které by se po sobě pohybovaly jako hladké nitkovité útvary. V praxi však nelze těchto podmínek dosáhnout /8/.

V oblasti středních a vyšších smykových rychlostí lze závislost smykového napětí na smykové rychlosti popsat mocninovým vztahem, který se udává ve tvaru:

$$\dot{\gamma} = \Phi \cdot \tau^m \quad (4)$$

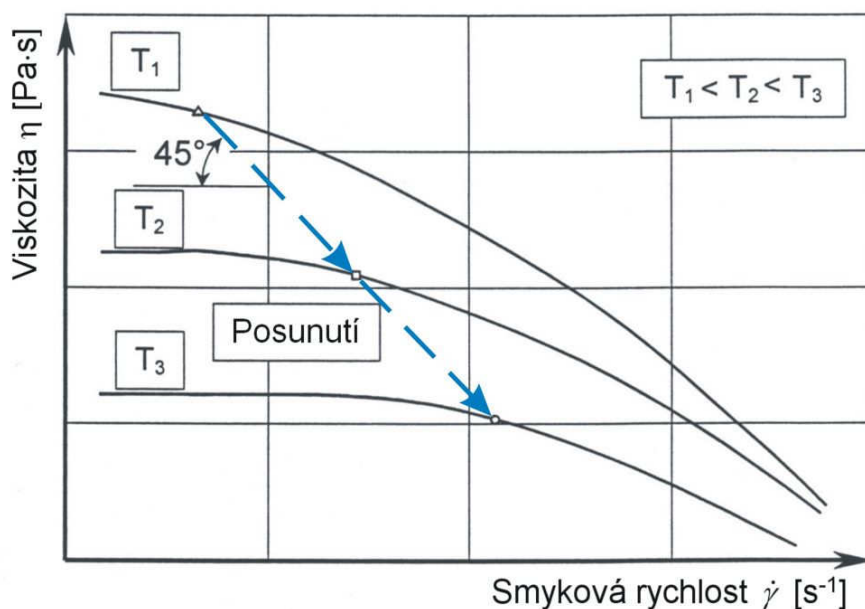
Φ je koeficient tekutosti a odpovídá smykové rychlosti při zvolené hodnotě smykového napětí a m je exponent mocninového zákona vyjadřující velikost odchylky tokového chování od newtonského /8/.

Dynamickou viskozitu taveniny však ovlivňuje také teplota a tlak. Přibližně lze závislost viskozity taveniny plastů na teplotě popsat Arrheniovou rovnicí, která

vychází z energetické teorie toku. Z té je patrné, že viskozita newtonských kapalin s rostoucí teplotou klesá podle exponenciální funkce. Arrheniova rovnice ovšem platí pouze při vyšších teplotách, kdy se chování taveniny blíží chování newtonské kapaliny. /13/

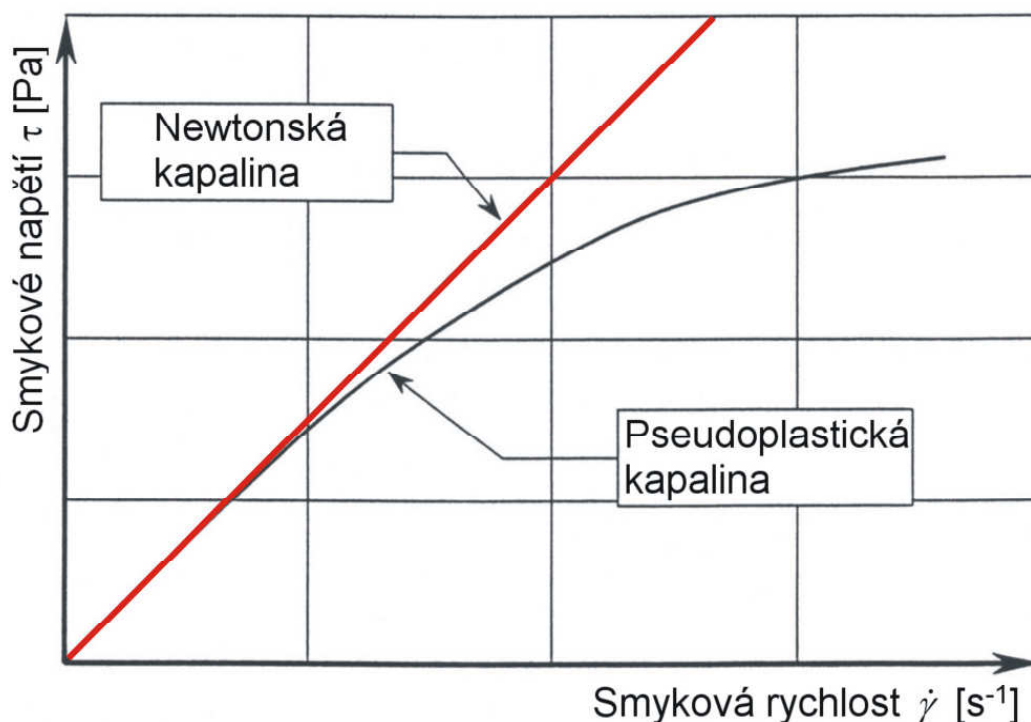
$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\left(\frac{E}{R_m T}\right)} \quad (5)$$

Z grafu křivek viskozit vynesných v logaritmických souřadnicích pro různé teploty taveniny plastu je zřejmé, že ačkoli se poloha křivek s teplotou mění, tvar křivky zůstává stejný (viz obr. 7). Pokud jsou křivky viskozity posunuty podél čar pod úhlem 45°, překrývají se jedna přes druhou. Všechny křivky viskozity mají tvar tzv. generalizované křivky viskozity, která je nezávislá na teplotě. Tento jev se také nazývá princip posunutí teploty /13/.



Obr. 7. Vliv teploty na viskozitu plastu, princip posunutí teploty /13/

K měření tokových vlastností tavenin plastů se používají plastometry vytlačovací nebo rotační. Tokové křivky, které jsou zobrazeny na obr.8, zachycují při konstantní teplotě závislost smykové rychlosti $\dot{\gamma}$ na smykovém napětí τ . V logaritmických souřadnicích je u newtonských kapalin smykové napětí přímo úměrné smykové rychlosti a tato závislost je dána přímkou, u které je směrnice rovna jedné. Toková křivka v logaritmických souřadnicích pro pseudoplastické kapaliny má ovšem směrnici rovnou exponentu mocninového zákona m , což znamená, že smykové napětí vzrůstá degenerativně se smykovou rychlostí. /8/,/13/



Obr. 8. Obecné tokové křivky pro newtonské a pseudoplastické kapaliny /13/

2.2.1 Viskoelasticita polymerních tavenin

Taveniny polymerů vykazují vždy větší či menší kaučukovitou elasticitu. Ta se projevuje např. ve zvětšování rozměrů taveniny po výstupu z trysky. Zvětšení rozměrů představuje určitou energii, kterou je třeba tavenině dodat a závisí na tlaku, kterému je tavenina vystavena při průchodu tryskou /8/.

Celkovou energii potřebnou k průchodu taveniny kapilárou je možné rozdělit na několik dějů. Použitý tlakový rozdíl p_c se při toku viskoelastické taveniny kapilárou spotřebuje jednak na vlastní viskózní tok a dále na překonání elastického odporu taveniny. U viskózního toku se jedná o vytvoření rychlostního profilu v kapiláře a s tím spojené překonávání viskózních odporů, které se vlivem tření později změní v teplo (p_q). Elastický odpor taveniny je třeba překonat při jejím vtlačování do kapiláry a vytlačování z kapiláry (p_e), což se projevuje jako kinetická energie vytékající taveniny. Z výše popsaného plyne, že k dosažení určité objemové průtokové rychlosti je nutno vynaložit větší množství práce, což tedy znamená, působit větším tlakem než jaký by odpovídal samotnému viskóznímu toku v trysce. Tlakovou bilanci lze pak zapsat vztahem:

$$p_c = p_q + p_e \quad (6)$$

Po dosazení vztahu pro p_q , vycházející z rovnováhy sil působících na elementární vrstvu ve tvaru válcového pláště v ustáleném stavu, získáme závislost:

$$p_c = 2 \cdot \tau \cdot \frac{l}{r} + p_e \quad (7)$$

Bylo zjištěno, že p_e na délce kapiláry nezávisí, p_q však s její délkou roste. Pro výpočet tlakového spádu Bagley zavedl korekci k , která má význam efektivní hodnoty l/r odpovídající tlakové ztrátě p_e . Vztah po zavedení Bagleyho korekce lze napsat ve tvaru:

$$p_c = 2 \cdot \tau \cdot \left(\frac{l}{r} + k \right) \quad (8)$$

Bagleyho korekce závisí na smykové rychlosti, teplotě taveniny a také na geometrii kapiláry. Pro trysky, u kterých je l/r větší než 30, procházejí Bagleyho přímkou počátkem a tudíž k je rovno nule [8,13].

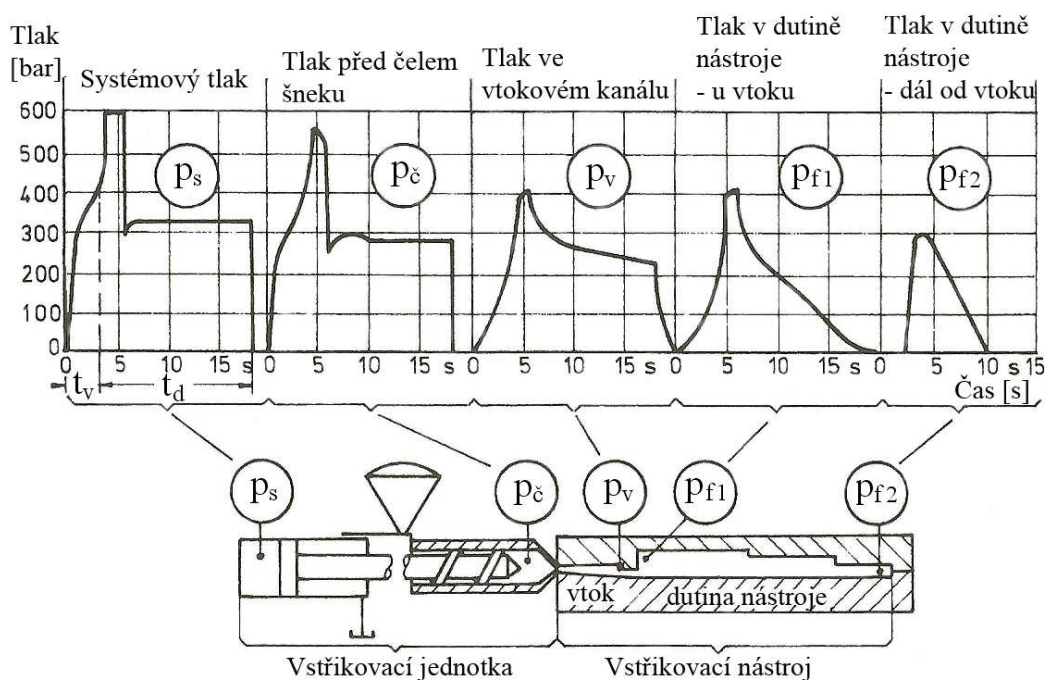
Měřením dvojloemu během toku byla získána představa o velikosti elastické deformace taveniny v kapiláře. Bylo zjištěno, že deformace se projevuje již v zásobníku nad tryskou a maxima dosahuje ve vstupu do kapiláry. Za vstupem dvojloem klesá, což ukazuje na zmenšení elastické deformace a na jistou relaxaci. Po výstupu z kapiláry tavenina „narůstá“ a vytlačený profil má větší průměr než kapilára. Narůstání je v podstatě způsobeno elastickým zotavením po ukončení toku, uvolněním elastické deformační energie obsažené v tavenině [8].

2.3 Průběhy tlaků u vstřikovacího procesu

Zaznamenané tlakové průběhy snímané v různých místech během vstřikovacího procesu vykazují značné rozdílnosti. Jak je z obr.9 patrné, liší se již systémový tlak p_s v hydraulické jednotce od specifického tlaku p_c zaznamenaného před čelem šneku uvnitř vstřikovací jednotky. Vlivem stlačitelnosti taveniny dochází k rozdílu mezi rychlostí pohybu šneku a skutečnou rychlostí proudění taveniny, což se projevuje nejen ve vstřikovací jednotce, ale ještě výrazněji přímo v nástroji a to nejen na dosažených hodnotách tlaku, ale i na čase. Obecně se dá konstatovat, že vstřikovací proces ovlivňují z hlediska jednotlivých měřených průběhů tlakové ztráty, které dle svého původu s postupem taveniny ze šneku směrem do nástroje vstupují do vstřikovacího procesu.

Odlišné tlakové průběhy najdeme také v nástroji, kde s narůstající délkou toku pozorujeme výraznější rozdíly v naměřených hodnotách. U vtokového ústí bude tlaková křivka nabývat vyšších hodnot než křivka v nejvzdálenějším místě výrobku.

Po plnění a následné dotlakové fázi nebo při předčasném zatuhnutí vtokového ústí dochází k výraznému poklesu tlaku v dutině nástroje, jelikož tavenina ze vstřikovací jednotky již nemůže proudit do dutiny nástroje.



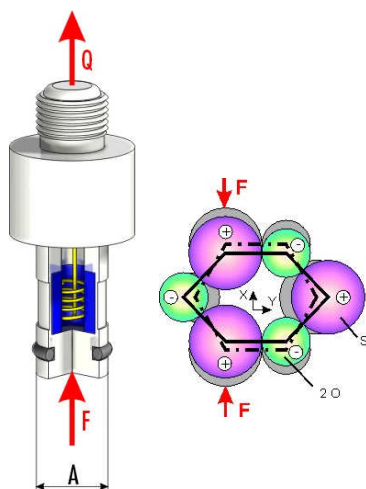
Obr. 9. Průběhy tlaků během vstřikovacího procesu /13/

2.3.1 Způsoby měření tlaku /5/, /7/

V současné době je stále více rozšířenější přísné monitorování charakteristických parametrů technologického procesu, mezi které patří také tlak v dutině nástroje. Navíc se stále zvyšují nároky na kvalitu vstřikovaných dílů a proto se začínají také více využívat tlakové snímače k monitorování procesu či jeho samotnému řízení. Asi nejrozšířenějším je elektrické měření tlaku v dutině nástroje, které umožňuje kontinuální záznam a zpracování přímo v řízení vstřikovacího stroje nebo externě pomocí notebooku.

Standardně jsou rozšířenější díky svým rozměrům více piezoelektrické snímače oproti tenzometrickým. Piezoelektrické snímače propouští elektřinu úměrně k vnitřnímu tlaku. Proporcionalita je označována jako citlivost a je udávána v

pC/bar. Za normálních okolností citlivost kolísá a pro každý snímač se musí nastavit její specifická hodnota. Dále můžeme měření tlaků uvnitř nástroje rozdělit na přímé, nepřímé a na kombinované s měřením kontaktní teploty.



Obr. 10: Piezoelektrický efekt: /12/

Při přímém měření dochází ke styku taveniny se snímačem, který kopíruje svou plochou tvar výrobku (viz obr. 11). Musí být tedy konstrukčně dimenzován tak, aby odolával teplotnímu zatížení ze strany taveniny a poskytoval spolehlivé a opakovatelné měření. Na výrobku zůstává vzhledová stopa a proto se častěji snímač umísťuje na stranu tvárníku, která je zpravidla nevzhledová. Instaluje se do vyvrtaného otvoru buď samotný, kdy je potřeba konstrukčně uzpůsobit tvárník, nebo pomocí adaptéru, kdy se vyvrtá pouze otvor o požadovaném průměru. Pro přímé měření jsou standardizovány snímače o průměru 1mm – 9.5mm.



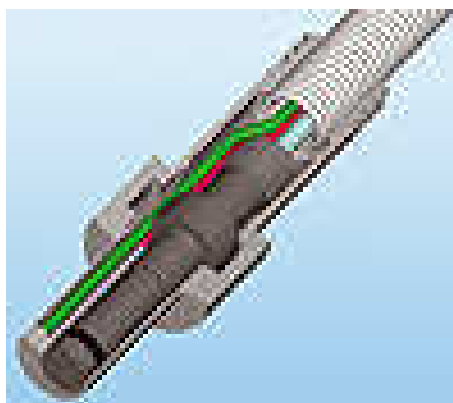
Obr. 11: Snímač pro přímé měření tlaku: /12/

Nepřímé snímače se používají v případě, kdy na výrobku nemůže zůstat viditelná stopa nebo tvar výrobku neumožňuje použití přímého snímače a umísťují se nejčastěji za vyhazovací kolík (viz obr. 12). Nepříznivé podmínky jako tření, ohyb vyhazovacího kolíku, prohýbání vyhazovací desky nebo znečištění vodícího otvoru kolíku negativně ovlivňují naměřené hodnoty a související kontrolu procesu. Proto se s výhodou používá přímé měření vnitřních tlaků.



Obr. 12: Snímač pro nepřímé měření tlaku: /12/

Kombinované snímače pro měření tlaku a teploty jsou schopné měřit obě veličiny, tj. teplotu a tlak, ve stejném místě vstřikovaného dílu a používají se pro sledování tlaku a teploty nejen uvnitř vstřikovacího nástroje, ale i pro sledování veličin uvnitř vstřikovací jednotky - před čelem šneku.

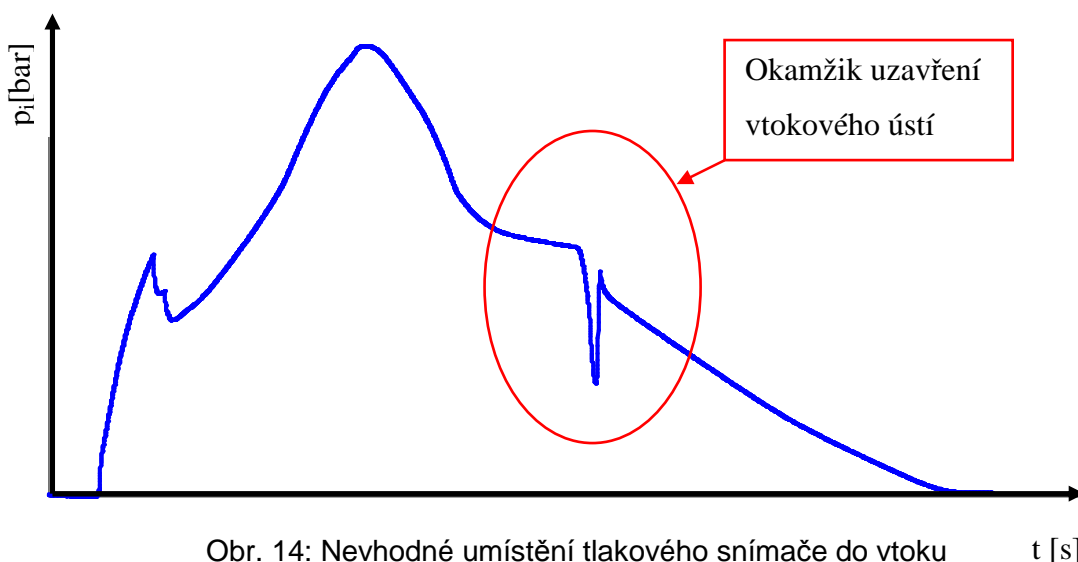


Obr. 13: Snímač pro přímé měření tlaku a teploty: /12/

2.3.2 Poloha snímače tlaku v dutině nástroje /5/, /9/, /11/

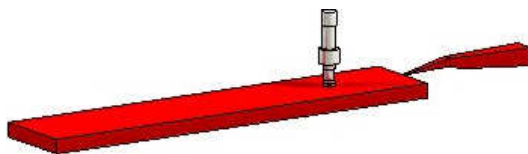
Po výběru typu snímače tlaku je třeba určit místo měření tlaku v dutině nástroje a pro toto umístění zvolit nejvhodnější velikost snímače tlaku nebo již s umístěním snímače počítat při konstrukčním návrhu vstřikovacího nástroje. Na poloze snímače tlaku závisí jak maximální tlak naměřený během vstřikovacího cyklu, tak i tvar tlakové křivky.

Počátek měření vnitřního tlaku v nástroji souvisí s postupem čela taveniny a dosažením polohy snímače. Proto by měl být snímač umístěn v blízkosti vtokového ústí k získání co možná největšího počtu dat v souvislosti s plněním dutiny. Na druhé straně umístění snímače do vtoku nebo přímo naproti němu má negativní vliv na měření zejména u uzavíratelných trysek. Během uzavření vtoku pomocí jehly dochází k výraznému působení dynamických sil na bezprostřední okolí vtoku a tím zkreslování sledovaného vnitřního tlaku.



Obr. 14: Nevhodné umístění tlakového snímače do vtoku t [s]

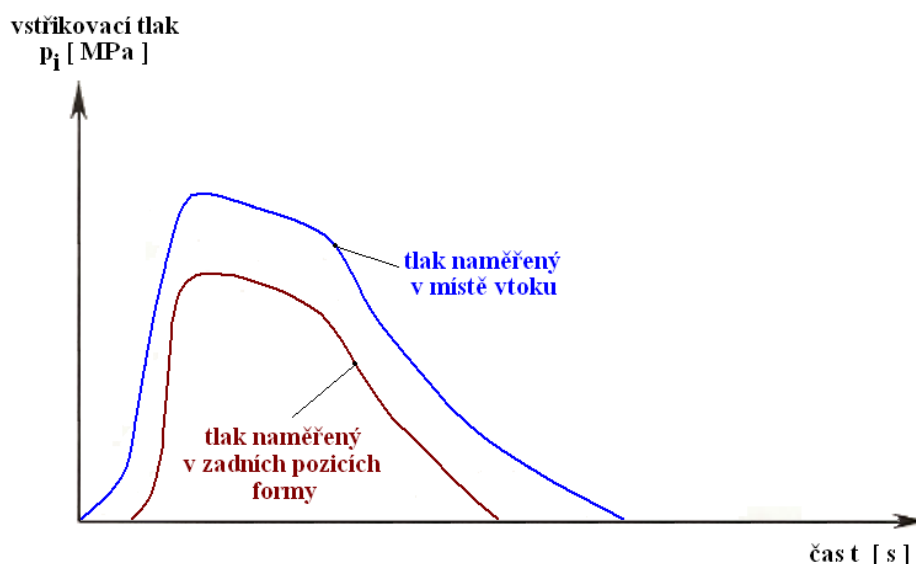
V úvahu je třeba také brát, pro umístění snímače, rozdílnou tloušťku výlisku, kdy místa s největší tloušťkou mají nejdéle plastické jádro a působení tlaku je zde nejrozsáhlejší. Z výše popsaného vychází doporučení, kdy u otevřených vtokových systémů a u dílů s menším poměrem délky toku a tloušťky stěny je nejvhodnějším umístěním pro tlakový snímač oblast vzdálená 20-30% z celkové tokové dráhy. Upřednostněním kvalitativního hlediska, jakožto hlavní funkce tlakového snímače, je pak vhodným umístěním oblast určující kvalitu výrobku, zvláště pokud je tato vzdálena 30-40% z celkové tokové dráhy.



Obr. 15: Vhodné umístění tlakového snímače: /12/

Pro vícenásobné nástroje by měly být jednotlivé otisky včetně studených kanálů a vtokových ústí co nejvíce vyváženy. Rozdíl hmotnosti při naplnění cca 80% objemu by neměl mezi jednotlivými otisky přesáhnout 5%.

Pro díly s velkým poměrem délky toku a tloušťky stěny a pro nástroje s uzavíratelnými tryskami se používají zpravidla snímače dva, kdy poloha druhého snímače je daleko od vtokového ústí a slouží zejména k získávání údajů pro kvalitativní účely nebo ke sledování možných tlakových špiček, které by mohly negativně ovlivnit funkci tahačů jader jako např. tvarových vyhazovačů, hydraulických čelistí či prolisových kolíků a tím znemožnit správnou funkci nástroje nebo dokonce jeho poškození. Pokud chceme použít tlakový snímač pro funkci přepnutí na dotlak, pak jeho umístění na konec tokové dráhy není zcela vhodné, neboť se zde začne projevovat tlak prakticky až s nástupem kompresní fáze, což klade obrovské nároky na vstřikovací stroj resp. na jeho reakční dobu při obdržení signálu pro přepnutí na dotlak. Mohlo by tak často docházet k výskytu přetoků na výlisku či k poškození nástroje.



Obr. 16: Průběhy tlaku uvnitř dutiny nástroje v závislosti na poloze snímače: /9/

2.4 Diagram p-v-T /13/

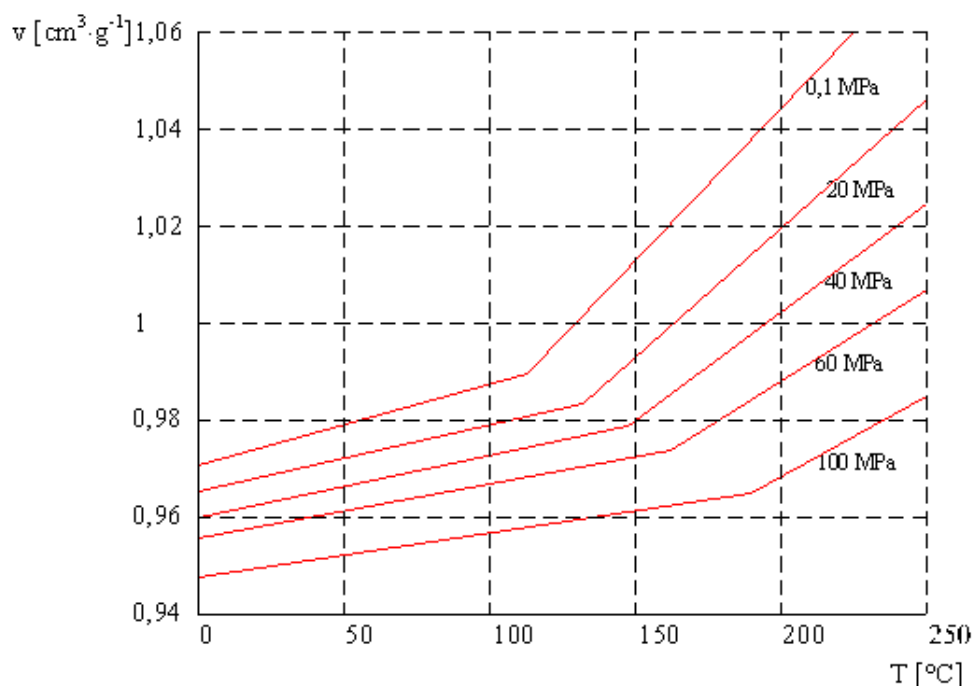
Zachycuje závislost stavových veličin tlaku p , měrného objemu v a teploty T . Diagram p - v - T bývá běžně zobrazován ve formátu 2-D, kdy měrný objem je funkcí teploty při různých konstantních hodnotách tlaků. Každému jednotlivému plastickému materiálu přísluší jeho vlastní specifický p - v - T diagram.

Nejznámější stavovou rovnicí pro výpočet závislosti měrného objemu na teplotě a tlaku je **van der Waalsova rovnice**, která se zapisuje v následujícím tvaru:

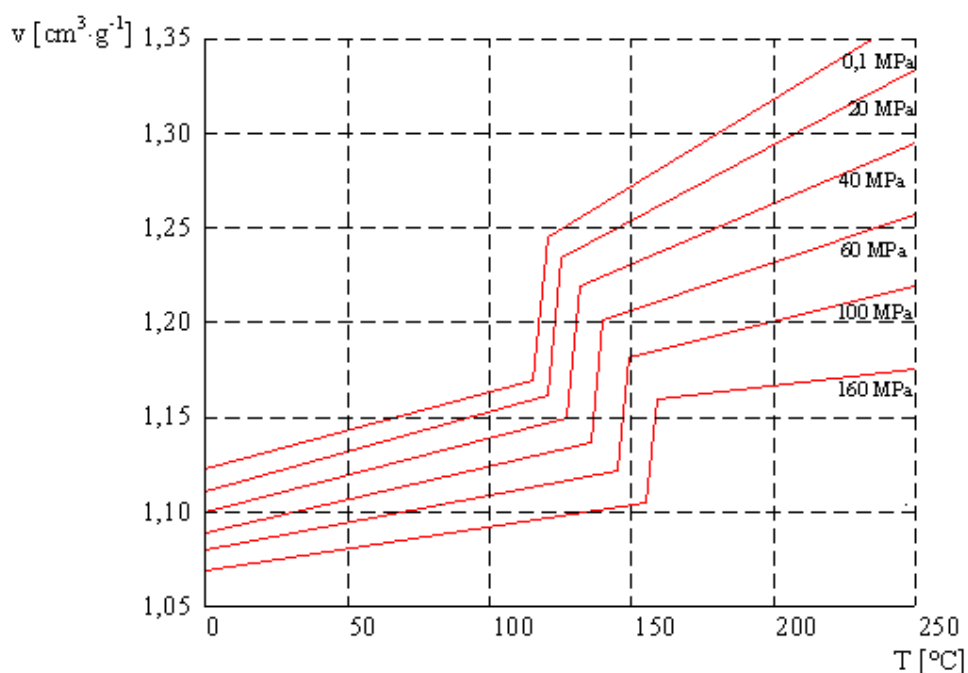
$$(p + \pi) \cdot (v - \omega) = R_m \cdot T \quad (9)$$

kde p je vnější tlak, π je vnitřní tlak vznikající v důsledku sil působících uvnitř hmoty, v je měrný objem polymeru, ω měrný objem polymeru při 0 K, T je teplota, R_m materiálová konstanta polymeru analogická plynové konstantě /13/.

V souřadném systému teplota-měrný objem jsou křivky konstantního tlaku přímky. Směrnice přímky však nemají vlivem skokově se měnících vlastností polymerů v závislosti na teplotě stejnou hodnotu pro všechny teploty. Z tohoto důvodu vykazují izobarické přímky zlomy, které jsou vázány na přechodové teploty polymerů. Díky tomu mají konstanty R_m , ω a π jiné hodnoty v závislosti na tom, ve které oblasti vymezené přechodovými teplotami se aktuální teplota polymeru nachází. Na základě odlišného vlivu teploty na vlastnosti amorfních a semikrystalických polymerů se od sebe liší i následující p - v - T diagramy /13/.



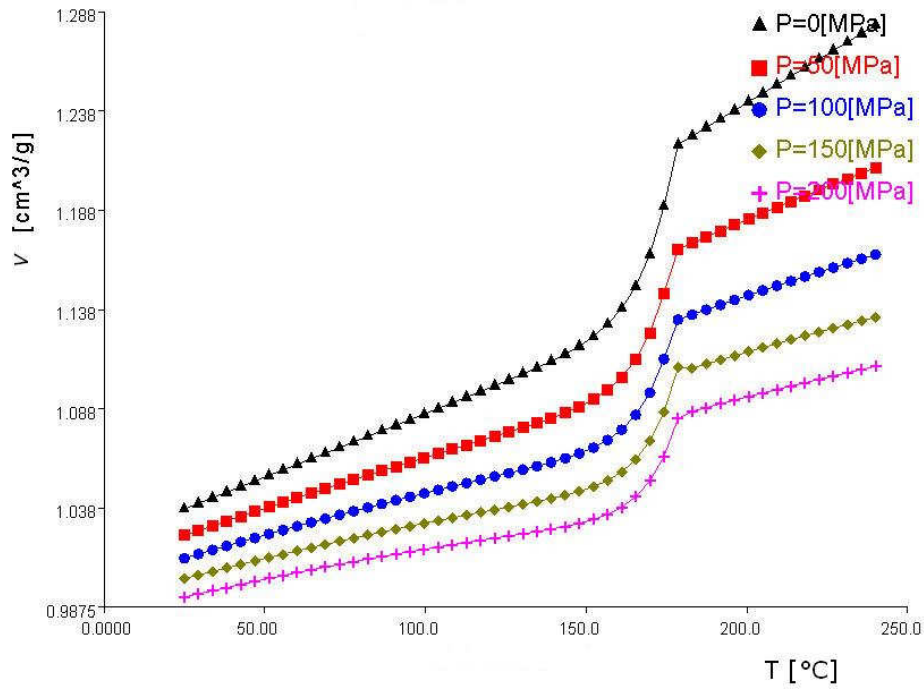
Obr. 17. Diagram p-v-T pro amorfní plast (polystyren) /13/



Obr. 18. Diagram p-v-T pro semikrystalický plast (polypropylen) /13/

Z p-v-T diagramů pro amorfní i semikrystalické materiály lze vyčíst, že měrný objem díky teplotní roztažnosti vzrůstá s rostoucí teplotou polymeru. Naopak s rostoucím tlakem při konstantní teplotě dochází vlivem stlačitelnosti plastů k poklesu měrného objemu. Dále je z porovnání obou diagramů patrné, že u semikrystalických plastů dochází na přechodové teplotě (teplotě tání) ke skokové změně měrného objemu.

Van der Waalsova stavová rovnice nezachycuje zcela přesně chování plastů. Izobary v souřadnicích teplota - měrný objem mají totiž tvar přímek, které se ostře lámou v oblastech přechodových teplot. K výpočtům pomocí simulačních programů, jako je Moldflow, se pro lepší přiblížení reálnému stavu s výhodou používá modifikovaná **Taitova rovnice**. Při použití Taitovy rovnice jsou přímky izobar mírně zaobleny tak, aby se co nejvíce blížily skutečnosti. U semikrystalických plastů jsou navíc ostré zlomy izobar na spodní hranici oblasti krystalizace nahrazeny exponenciálními křivkami, jak zachycuje také p-v-T diagram konkrétního materiálu na obr. 19, který byl následně použit v experimentální části /13/.



Obr. 19. Diagram p-v-T vycházející z Taitovy rovnice pro PP použitý
v experimentální části /21/

Taitova rovnice slouží k popisu měrného objemu materiálu jakožto funkce teploty a tlaku. Obsahuje množství konstant specifických pro konkrétní materiál a má dosti komplikovaný tvar:

$$v(T, p) = v_0(T) \left\{ 1 - C \cdot \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right\} + v_1(T, p) \quad (10)$$

přičemž platí níže uvedené vztahy pro oblasti pod a nad přechodovou teplotou:

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1m} + b_{2m} \cdot \bar{T} \\ B(T) &= b_{3m} \cdot e^{-b_{4m} \cdot \bar{T}} \\ v_1(T, p) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{pro } T > T_{př} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1s} + b_{2s} \cdot \bar{T} \\ B(T) &= b_{3s} \cdot e^{-b_{4s} \cdot \bar{T}} \\ v_1(T, p) &= b_7 \cdot e^{(b_8 \cdot \bar{T} - b_9 \cdot p)} \end{aligned} \right\} \text{pro } T < T_{př} \quad (12)$$

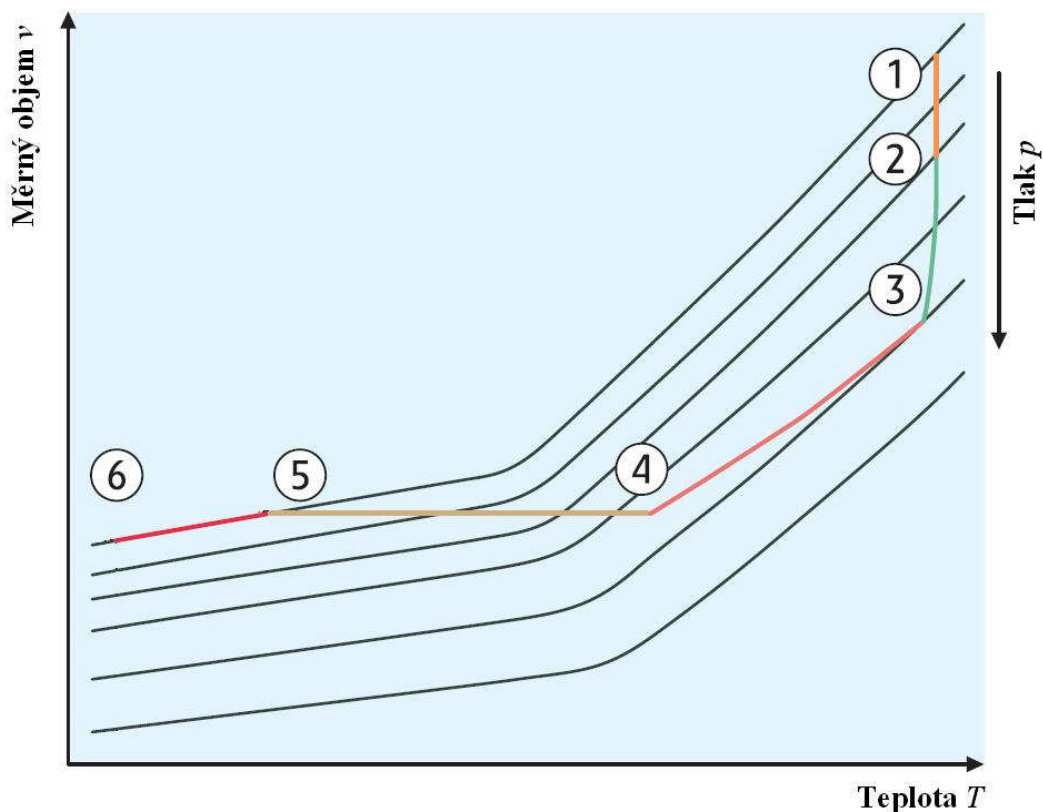
kde p značí tlak, v měrný objem polymeru, T je teplota, $T_{pf} = b_5 + b_6 \cdot p$ je přechodová teplota charakteristická pro daný materiál, $\bar{T} = T - b_5$, $C = 0,0894$ je univerzální konstanta a b_i jsou specifické materiálové konstanty pro zvolený typ polymeru /13/.

2.4.1 Vstřikovací cyklus v diagramu p-v-T /13/

Vstřikovací cyklus přenesený do p-v-T diagramu pro amorfnní plast, který je na následujícím obrázku č.26, je výrazně jednodušší než pro případ semikrystalického plastu. Nicméně v porovnání s diagramem vstřikovacího cyklu z pohledu průběhu tlaku v dutině nástroje umožňuje p-v-T diagram mnohem komplexnější náhled na probíhající děje během vstřikovacího cyklu.

Celý cyklus začíná izobarickým ohřevem plastu do stádia taveniny, což představuje v diagramu úsek z bodu 6 do bodu 1. Poté přichází na řadu fáze plnění, která je symbolizována v diagramu úsekem z bodu 1 do bodu 3 a je doprovázena nárůstem tlaku v dutině nástroje. Plnění dutiny nástroje lze ještě dále rozdělit na úsek 1-2, kdy bod 2 představuje hranici mezi objemovým naplněním dutiny nástroje při téměř konstantní teplotě taveniny a přechodem do kompresní fáze. Mezi bodem 3 a 4 se nachází úsek, který symbolizuje fázi dotlaku. Dotlak slouží zejména ke kompenzaci úbytku objemu taveniny v dutině nástroje, jelikož vlivem ochlazování dochází ke smršťování objemu plastu. Následuje úsek z bodu 4 do bodu 5, kdy během izochorického poklesu tlaku dospějeme až na hodnotu tlaku okolního prostředí. Poté následuje pokles teploty výstřiku, která v bodě 6 dosáhne hodnoty teploty okolního prostředí.

V současné době bývá s vývojem nových technologií spojena také implementace diagramů p-v-T do řízení vstřikovacího procesu za účelem dosažení co nejoptimálnějšího plnění dutiny nástroje a zvýšení stability výroby.

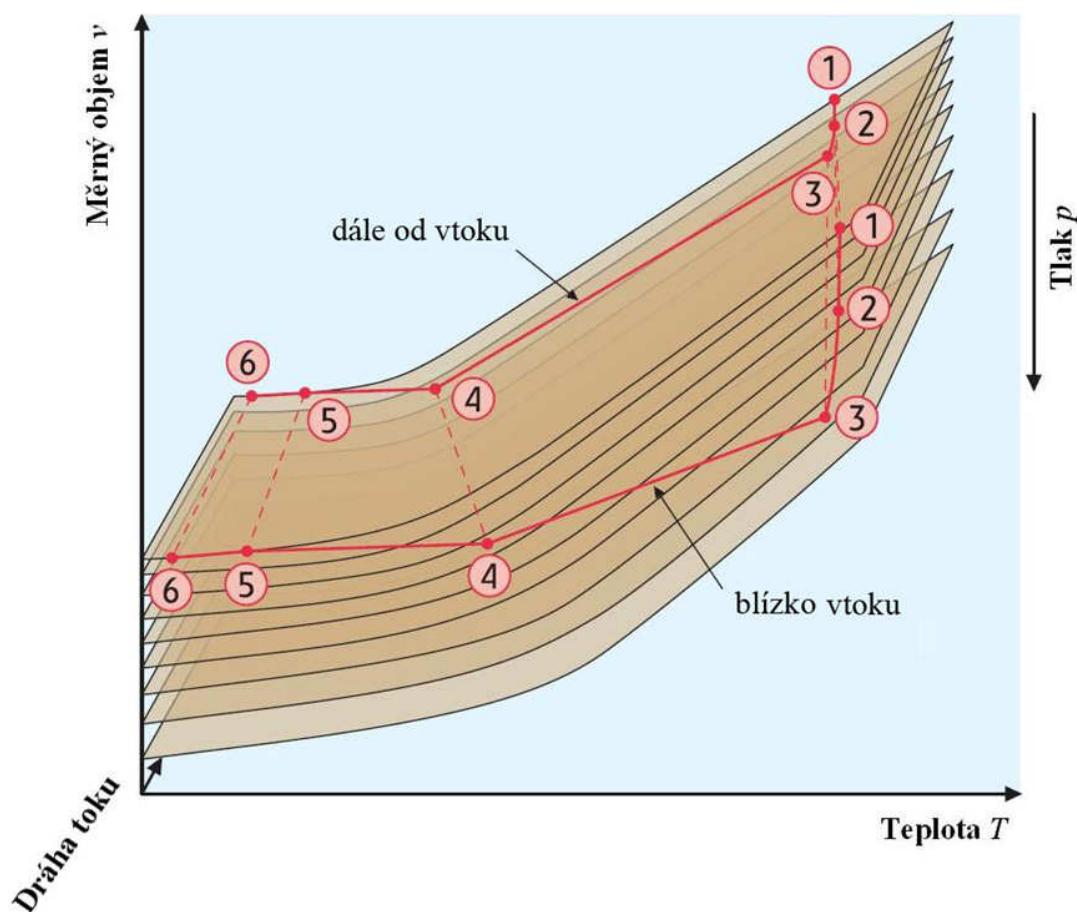


Obr. 20. Vstřikovací cyklus v p-v-T diagramu /13/

2.4.2 Vstřikovací cyklus ve 3-D diagramu p-v-T /13/

V předchozí kapitole byl popsán vstřikovací cyklus v diagramu p-v-T, který však postihuje probíhající děje pouze v jednom zvoleném místě. Pro komplexnější náhled na proces vstřikování se s výhodou rozšiřuje 2-D diagram p-v-T o dráhu toku taveniny, čímž vzniká trojrozměrný diagram p-v-T. S rostoucí dráhou toku taveniny rostou také tlakové ztráty, což se projevuje poklesem tlaku postupující taveniny. Výsledným projevem je nehomogenita měrného objemu, kdy tento roste s rostoucí dráhou toku taveniny. Výrazné rozdíly měrného objemu ve výstřiku vedou ke vzniku nežádoucího vnitřního pnutí.

Při snaze o minimalizaci vnitřního pnutí je třeba výše popsané skutečnosti zohlednit již v návrhu vstřikovacího systému budoucího nástroje. V případě konvenční metody vstřikování, pokud možno, zkracovat tokové dráhy plastu, využívat kaskádové vstřikování či volit materiály s co nejnižší viskozitou. Zejména v případě materiálů lze v poslední době sledovat trend snižování viskozity, který se týká jak polyolefinů, tak styrenových plastů. Takové materiály se vyznačují oproti standardním velmi vysokou hodnotou MFR. Z hlediska technologií přispívá ke snižování vnitřního pnutí ve výrobku technologie kompresního vstřikování.



Obr. 21. Vstřikovací cyklus ve 3-D diagramu p-v-T /13/

2.4.3 Průběh tlaku v dutině nástroje /5/

Průběh tlaku v dutině během plnění a dotlakové fáze vstřikovacího cyklu je zároveň výsledkem nastavení mnoha technologických parametrů a je také závislý na druhu plastu, tloušťce stěny výstřiku nebo na počtu plnicích míst. Tvar křivky tlaku uvnitř nástroje může zároveň poskytovat informaci pro nalezení vhodného okamžiku přepnutí ze vstřikovací fáze na dotlakovou nebo popř. odhalit chyby v nastavení technologických parametrů. Tlak taveniny plastu v dutině se výrazně mění během vstřikovacího cyklu a je tedy možné z křivky tlaku uvnitř nástroje určit samotné plnění dutiny nástroje a stlačování taveniny plastu v dutině, dále zadržení tuhnutí materiálu pod tlakem (dotlak) a následné chladnutí výstřiku v nástroji po vypnutí tlaku.

Ideální průběh tlaku taveniny v dutině nástroje je zachycen na následujícím obrázku. Po uzavření nástroje uzavírací silou (fáze t_{s1}), která musí být větší než je síla vyvolaná tlakem taveniny uvnitř nástroje, se přisune vstřikovací jednotka k uzavírací jednotce (fáze t_{s2}), kde je upnut nástroj. Tato fáze se vynechává u vyhřívaných vtokových systému s jehlovými uzávěry, protože při odjezdu vstřikovací jednotky po ukončení fáze dotlaku by vlivem zbytkového tlaku ve vyhřívané soustavě docházelo k vytlačování materiálu zpět přes vtokovou vložku do místa opětovného dosedu vstřikovací jednotky. Tuto fázi je možné také eliminovat u otevřených vyhřívaných vtokových systémů, ale zde je třeba velmi precizního nastavení teplot jednotlivých topných pásem vtokového systému, dekompresních fází ve vstřikovací jednotce a protitlaku ve fázi dávkování tak, aby po otevření nástroje nedocházelo k samovolnému vytékání materiálu do otevřené dutiny nástroje.

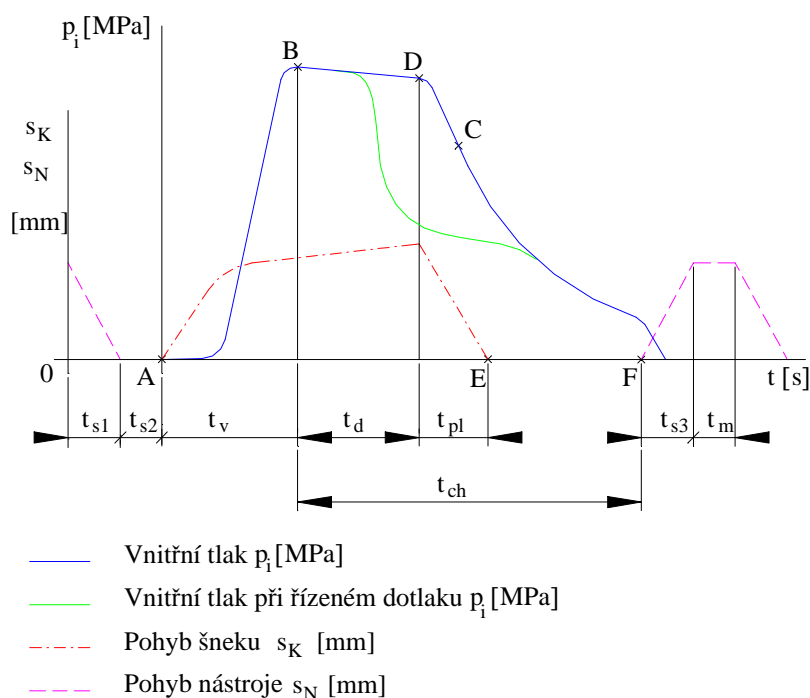
Po eventuálním přisunu vstřikovací jednotky se začne vstřikovat tavenina (poz. A) přes daný vtokový systém do dutiny nástroje. S narůstající délkou toku taveniny dochází také k nárůstu tlaku v dutině nástroje až do ukončení plnění objemu dutiny. Následuje prudké zvýšení tlaku v dutině nástroje až na maximum díky neustálému stlačování taveniny v dutině nástroje, které je ukončeno přepnutím na dotlak. Tato fáze vstřikovacího cyklu je označována jako čas vstřiku (t_v).

Úkolem dotlaku (počátek v poz. B) je zabránit zpětnému úniku taveniny z nástroje do vstřikovacího válce a zároveň vyrovnávat objemové změny v důsledku smršťování. Tlak v dutině během této fáze vstřikovacího cyklu klesá mírně, neboť tavenina je stále do dutiny dotlačována. Rychlý pokles tlaku v dutině může nastat v případě, že po skončení dotlakové fáze (poz. D) nebude ještě vtokové ústí zatuhlé.

Současně s dobou dotlaku probíhá chladicí fáze (t_{ch}), kdy pokračuje smršťování výstřiku a tlak v dutině klesá až na hodnotu zbytkového tlaku, který se nachází v dutině těsně před otevřením nástroje a vyjmutím výstřiku.

Tlak v dutině nástroje se obvykle pohybuje mezi 30 – 100 MPa. U polypropylenu je to mezi 30 – 60 MPa. Z technologických parametrů se na vnitřním tlaku významně podílí zejména vstřikovací rychlost, bod přepnutí resp. dávka, velikost dotlaku, doba dotlaku, teplota taveniny a teplota nástroje.

Po ukončení fáze chlazení (poz. F) dochází k otevření nástroje, často paralelně s odformováním dílu z obou polovin nástroje, čemuž v grafu odpovídá čas (t_{s3}) a poté následuje vyjmutí dílu manipulátorem (t_m).



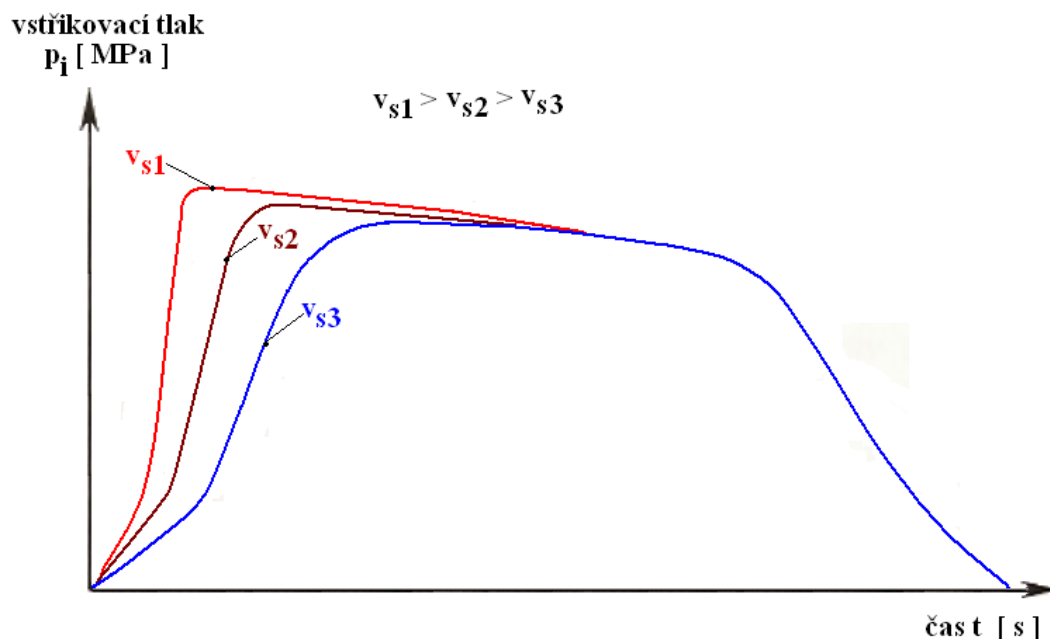
Obr. 22. Vstřikovací cyklus z pohledu průběhu tlaku uvnitř nástroje

2.4.4 Vliv vybraných technologických parametrů na průběh vnitřního tlaku v nástroji /1/, /5/, /8/, /9/

Mezi nejvýznamnější technologické parametry zásadně ovlivňující průběh vnitřního tlaku v nástroji patří vstřikovací rychlost, bod přepnutí na dotlak resp. dávka, velikost a doba dotlaku, teplota taveniny a teplota nástroje. Vlivy od nastavení jednotlivých parametrů se mohou sčítat, ale mohou působit taktéž proti sobě.

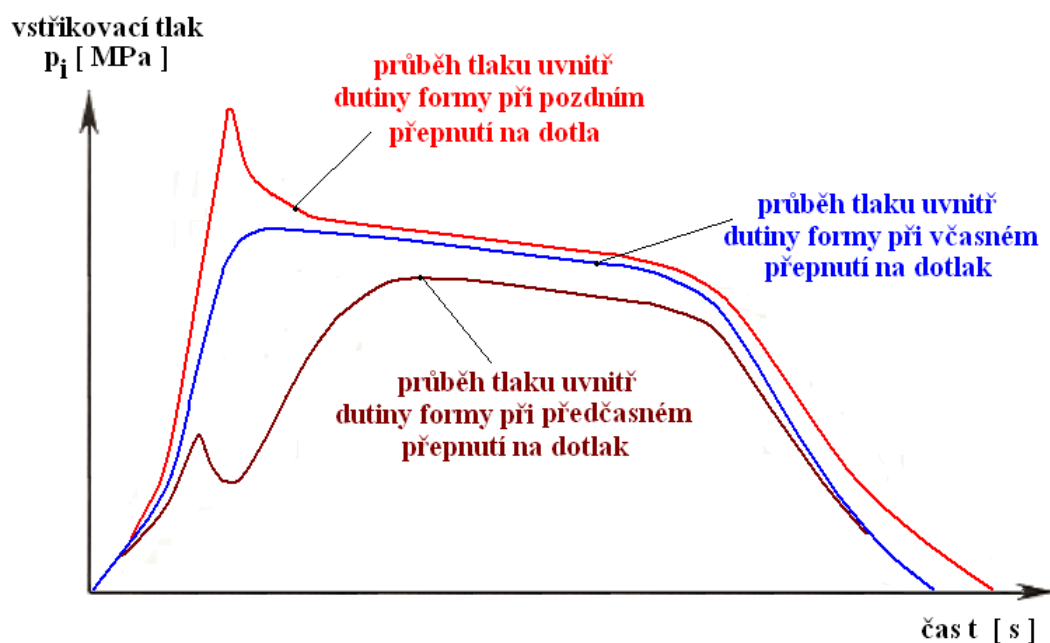
Nastavení vstřikovací rychlosti ovlivňuje dobu plnění dutiny resp. rychlost postupu čela taveniny uvnitř dutiny nástroje. Na obr. 23 je znázorněn průběh vnitřního tlaku nástroje v závislosti na velikosti vstřikovací rychlosti. Čím bude vstřikovací rychlost vyšší, tím bude křivka v oblasti vstřiku strmější a tedy nárůst vnitřního tlaku výraznější. Zároveň díky zvyšování rychlosti vstřikování stoupá smykové namáhání taveniny, snižuje se její viskozita, dochází ke zvýšení teploty taveniny a při plnění dutiny nástroje se může projevit vada jetting. Změna vstřikovací rychlosti se v dotlakové fázi zpravidla neprojevuje. Možné ovlivnění může nastat v případě velmi nízké vstřikovací rychlosti, kdy výstřik v poměru k fázi plnění chladne rychleji a velmi významně se zužuje plastické jádro pro dotlakovou fázi. To

může vést až k vyrobení neúplného dílu, kdy toková fronta tzv. zamrzne. Navíc dochází k výrazné orientaci a příkladem typické vady jsou viditelné studené spoje.



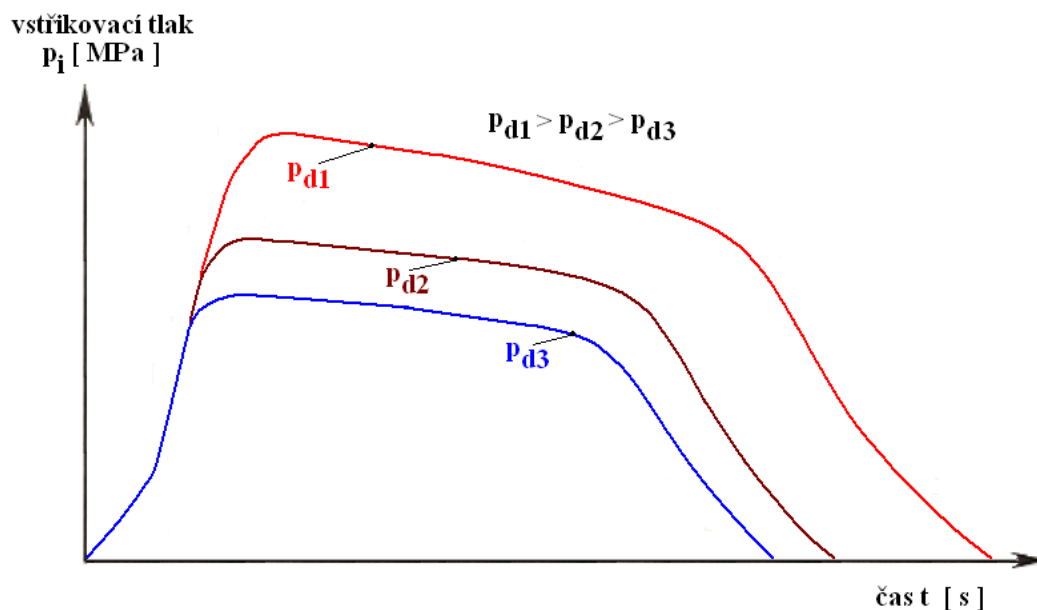
Obr. 23: Vliv vstřikovací rychlosti na průběh tlaku uvnitř nástroje: /9/

Vliv momentu přepnutí ze vstřikovací fáze na dotlakovou fázi resp. dávky materiálu tkví v množství vstříknuté taveniny, než dojde k samotnému přepnutí. Při správném nastavení okamžiku přepnutí, kdy je dutina právě nebo téměř naplněna, je průběh vnitřního tlaku plynulý, bez tlakových špiček. Při předčasném přepnutí na dotlakovou fázi dochází k výraznému poklesu vnitřního tlaku a plnění je dokončeno dotlakovou fází. Výsledkem může být neúplný díl, výrazné propadliny a tokové čáry či křehké studené spoje. Oproti tomu pozdní přepnutí na dotlak má za následek prudký nárůst vnitřního tlaku v dutině, kdy může dojít vlivem překonání uzavírací síly k pootevření nástroje a zastříknutí dělicí roviny. Dalším průvodním jevem může být orientace v okolí vtokového ústí. Nejrozšířenější je řízení okamžiku přepnutí na dotlak pomocí dráhy šneku, objemu taveniny nebo času. Méně používané je řízení pomocí hydraulického nebo vnitřního tlaku, které je ale v technické literatuře uváděno jako nepřesnější.



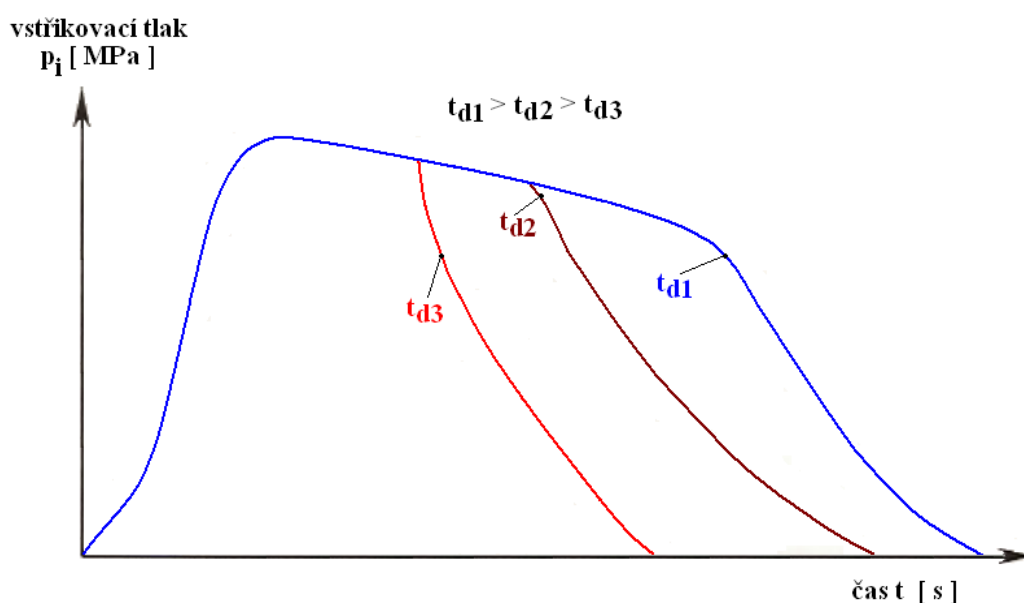
Obr. 24: Vliv okamžiku přepnutí na dotlakovou fázi na průběh vnitřního tlaku nástroje: /9/

Velikost dotlaku má asi největší vliv na průběh tlaku uvnitř vstřikovacího nástroje a její počátek se vztahuje k okamžiku přepnutí. Zároveň nejvýrazněji ovlivňuje výslednou kvalitu povrchu dílu. Vyšší hodnota dotlaku způsobuje nárůst tlaku uvnitř dutiny nástroje a celkové prodloužení tlakové křivky, kdy může dojít až k výskytu zbytkového tlaku, který přetrvává v dutině nástroje až do momentu otevření. Dalším projevem vyšší hodnoty dotlaku bývá zpravidla nárůst hmotnosti dílu, pokles hodnoty smrštění, ale také zvýraznění vnitřních pnutí ve výrobku. Z hlediska kvality dílu často vede ke vzniku zástříků. Oproti tomu nízká hodnota dotlaku vede zpravidla ke vzniku propadlin, lunkrů a k nárůstu hodnoty smrštění, eventuálně k vyšším hodnotám deformací, které díl vykazuje.



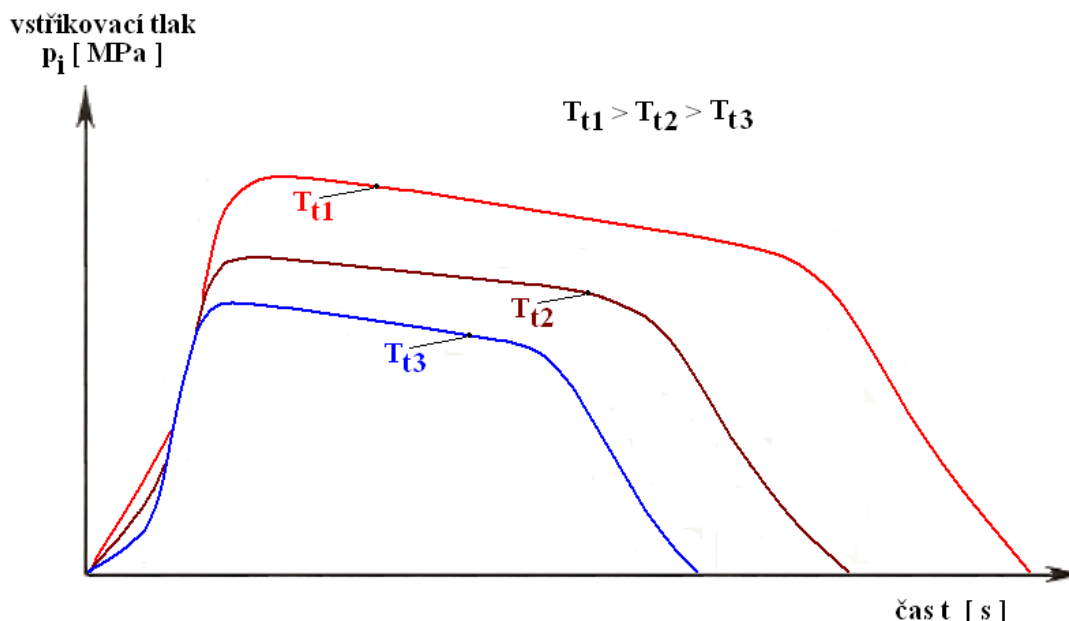
Obr. 25: Vliv velikosti dotlaku na průběh tlaku uvnitř nástroje: /9/

Doba dotlaku se spolu s velikostí dotlaku podílí na výsledné kvalitě povrchu dílu, zároveň je nutná pro ztuhnutí vtokového ústí. Pokud je doba dotlaku příliš krátká, díl vykazuje povrchové vady propadliny. Navíc stoupá hodnota smrštnění a díky neztuhnutému vtokovému ústí dochází ke zpětnému pohybu taveniny, což vede k dodatečné orientaci makromolekul a ke kolísání hmotnosti. Při výrazně delší době dotlaku může dojít k tvorbě zástříků, ale jen do doby, než ztuhne vtokové ústí, kdy je již přísun taveniny do dutiny nástroje znemožněn. Dochází také k nárůstu času cyklu.



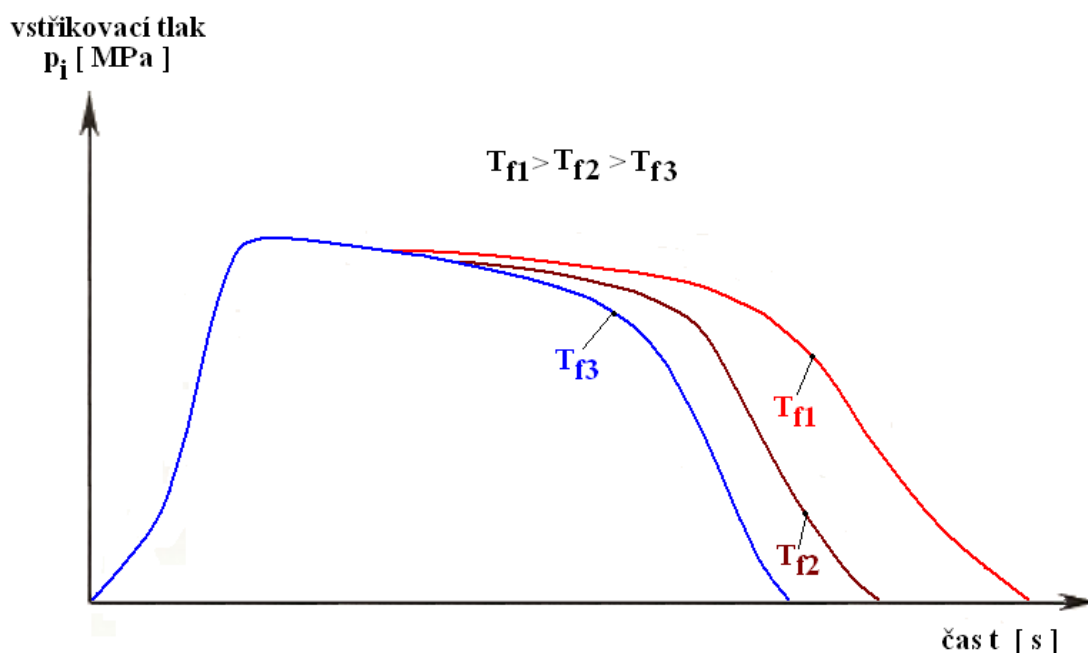
Obr. 26 : Vliv doby dotlaku na průběh tlaku uvnitř dutiny nástroje. /9/

Změnou teploty taveniny měníme zároveň její viskozitu. Vyšší teplota taveniny tedy způsobí snížení viskozity. Při zachování hodnoty vstřikovací rychlosti klesá potřebná hodnota hydraulického tlaku, ale dochází ke zvýšení tlaku uvnitř vstřikovacího nástroje. Navýší se také čas cyklu, jelikož vzroste čas chlazení i doba dotlaku potřebná ke ztuhnutí vtokového ústí. S nižší teplotou taveniny stoupá orientace a zvyrazňují se vady jako jsou např. studené spoje.



Obr. 27 : Vliv teploty taveniny na průběh tlaku uvnitř dutiny nástroje. /9/

Teplota nástroje (viz obr. 28) má velký vliv jak na kvalitu povrchu dílu, tak na rozměrovou přesnost a výsledné mechanické vlastnosti. Výše teploty nástroje je důležitá zejména během dotlakové fáze, kdy výrazně ovlivňuje rychlost chlazení taveniny plastu. Vyšší teplota nástroje způsobuje mírné zvýšení tlaku v dotlakové fázi, pozvolnější pokles křivky vnitřního tlaku a snížení vnitřních pnutí díky pomalejšímu chlazení výstřiku. Dále má vyšší teplota nástroje pozitivní vliv na výskyt tzv. tygr efektu. Zároveň se zvyšuje riziko vzniku propadlin a proto je nutné zpravidla prodloužit fázi chlazení, což vede také k prodloužení času cyklu. Naopak nižší teplota nástroje způsobuje výraznější orientaci, studené spoje a zvyšuje také hodnotu dodatečného smrštění.



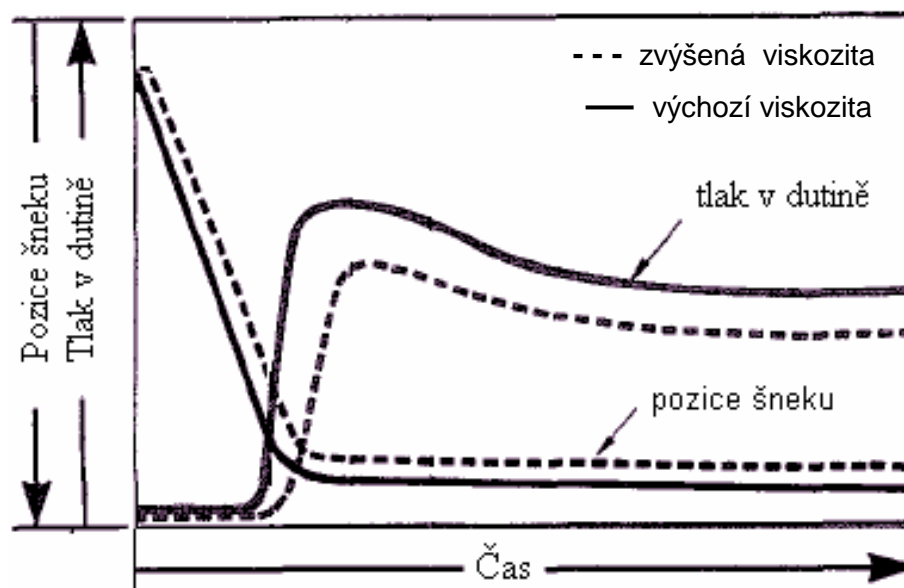
Obr. 28: Vliv teploty nástroje na průběh tlaku uvnitř dutiny nástroje. /9/

2.5 Řízení vstřikovacího procesu /13/

Výběr způsobu řízení vstřikovacího procesu je velmi důležitý vzhledem k očekávané stabilitě výrobního procesu. Ovlivňuje ji jednak chování tavenin plastů včetně kolísání materiálových hodnot v rámci smluvených tolerančních mezí, dále působení vnějších vlivů na systém stroj x nástroj x výstřik a nezanedbatelný je také vliv samotného vstřikovacího stroje a nástroje v průběhu času.

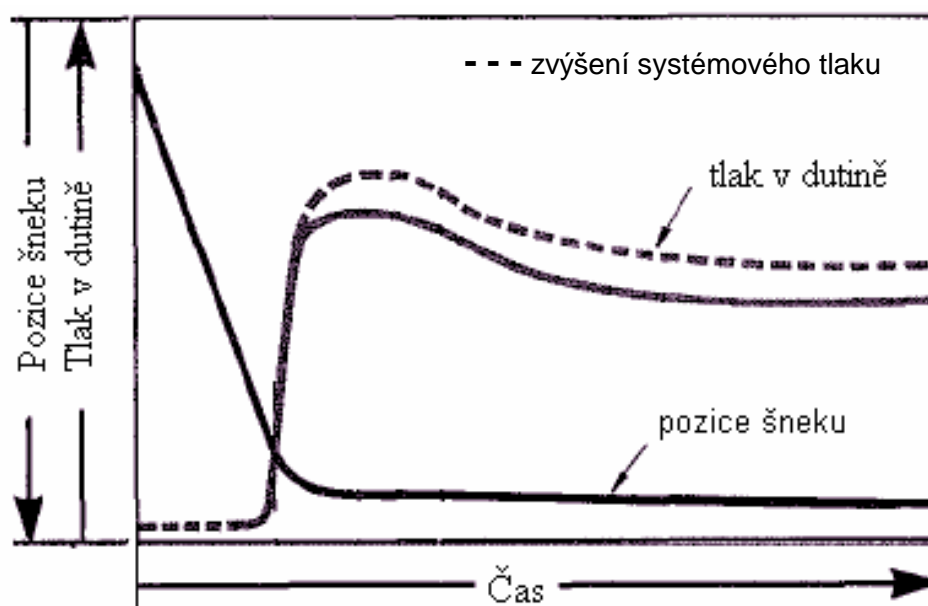
Mezi nejdůležitější parametry ovlivňující výslednou stabilitu vstřikovacího procesu patří pozice šneku, která je měřena nejčastěji pomocí dráhového snímače (příslušenství vstřikovacího stroje) a dále tlak v dutině nástroje sledovaný pomocí tlakových snímačů (příslušenství nástroje). Kolísání ostatních parametrů jako viskozita materiálu, systémový tlak, teplota taveniny atd. se přímo projeví v závislosti pozice šneku a tlaku v dutině nástroje na čase.

Kdyby byl vstřikovací proces řízen pomocí systémového tlaku a pozice šneku společně s tlakem v dutině nástroje by sloužily jen pro monitorizaci procesu, pak by docházelo ke značné variabilitě tohoto procesu. Se změnou viskozity taveniny při konstantním systémovém tlaku dojde ke změně vstřikovací rychlosti a hodnotě dosaženého tlaku v dutině nástroje (viz obr. 29).



Obr. 29: Vliv zvýšené viskozity taveniny na průběh pozice šneku a tlaku v dutině nástroje při zachování hodnoty systémového tlaku /13/

Pro dosažení původního průběhu pozice šneku je nutné zvýšit systémový tlak, což vyvolá větší smykové namáhání taveniny, pokles viskozity a tlak uvnitř nástroje dosáhne vyšších hodnot. Při výraznějším nárůstu tlaku uvnitř nástroje může dojít ke zvýraznění vnitřních pnutí ve výstřiku nebo dokonce ke vzniku zástříků na výrobku (obr.30).

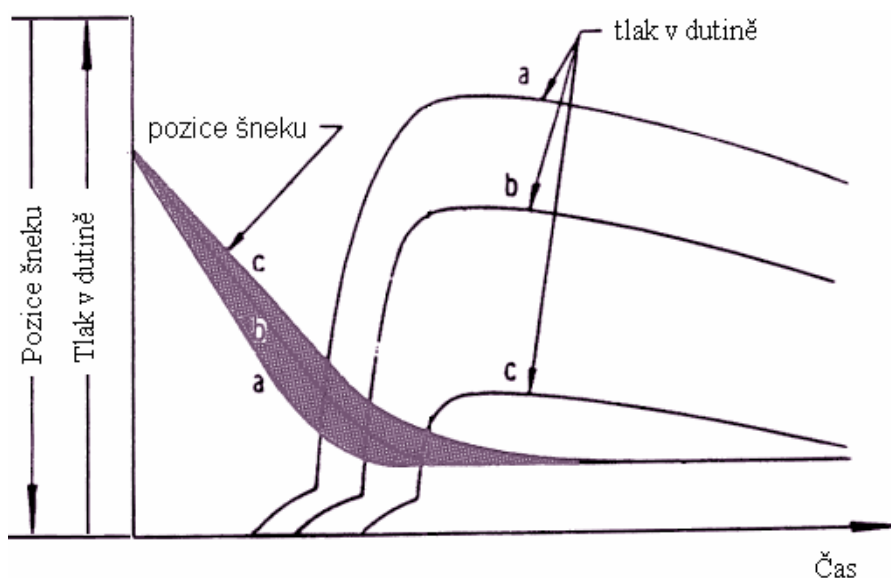


Obr. 30: Vliv zvýšení systémového tlaku za účelem dosažení požadované rychlosti pohybu šneku na tlak v dutině nástroje při zvýšené viskozitě taveniny /13/

2.5.1 Vliv viskozity taveniny na rychlost pohybu šneku

Rychlost pohybu šneku při plnění dutiny nástroje je závislá na odporu taveniny vůči šneku resp. na její viskozitě, pokud je vstřikovací proces řízen závislostí systémového tlaku na poloze šneku. S rostoucím systémovým tlakem a klesající viskozitou taveniny roste vstřikovací rychlost. Vliv rozdílné viskozity na rychlost pohybu šneku za stejné doby vstřiku je znázorněn na obr. 31. /13/

V případě vysoké rychlosti pohybu šneku (var. a) tlak v dutině nástroje značně roste až do konce doby vstřiku. Výsledkem je díl se zástříky nebo díl s většími rozměry mimo toleranci. Pokud je rychlost pohybu šneku malá (var. c), pak vnitřní tlak v dutině indikuje nedostříknutý díl nebo díl s propadlinami a rozměrovými odchylkami. Tato skupina parametrů (rychlost pohybu šneku, teplota taveniny, viskozita taveniny) má vliv na průběh tlaku v dutině nástroje, respektive na vlastnosti výstřiku. /13/

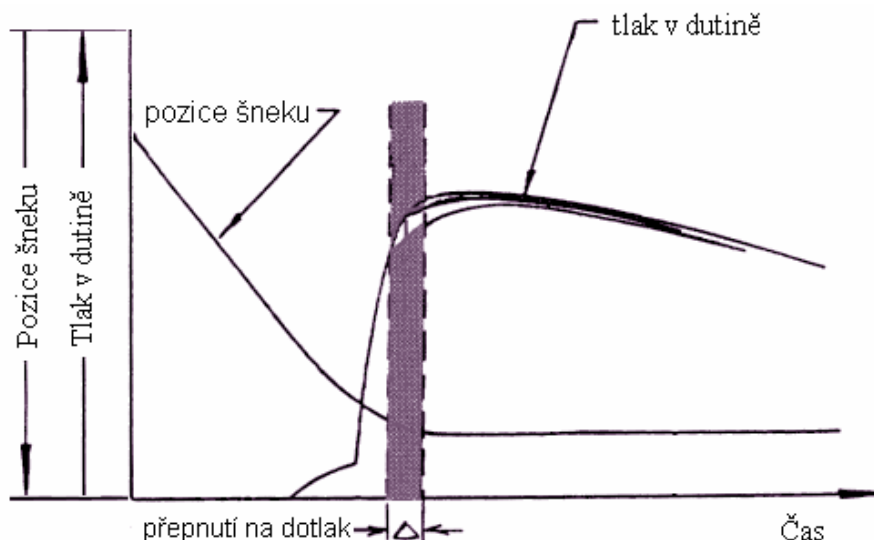


Obr. 31: Vliv viskozity taveniny na rychlost pohybu šneku /13/

2.5.2 Vliv kolísání času vstřiku na tlak v dutině nástroje

Standardně je možné u vstřikovacích strojů ohraničit fázi vstřiku a dotlaku pomocí nastavení určitého času vstřiku. Z hlediska stability je ale při tomto způsobu řízení vstřiku možno pozorovat mezi jednotlivými zdvihy rozdílné průběhy vnitřního tlaku v dutině formy a to zejména v oblasti kompresní fáze, kde se vyskytují tlakové špičky v okamžiku přepnutí na dotlakovou fázi (viz obr.32). Tyto rozdíly jsou způsobeny právě odlišnou délkou vstřikovací fáze, která je zapříčiněna odchylkami

spínání ventilů a elektromagnetů mezi jednotlivými výrobními cykly. Z tohoto důvodu se v praxi častěji používá přepnutí na dotlak podle polohy šneku odečítané pomocí dráhového snímače. Dalším možným způsobem ohraničení času vstřiku je přepínání na dotlakovou fázi podle objemu vstříknutého plastu do dutiny nástroje. Stále častěji se v poslední době setkáváme u průmyslových aplikací s nasazením přepínání na dotlak přímo dle vnitřního tlaku v nástroji. /13/



Obr. 32: Vliv kolísání času vstřiku na tlak v dutině nástroje

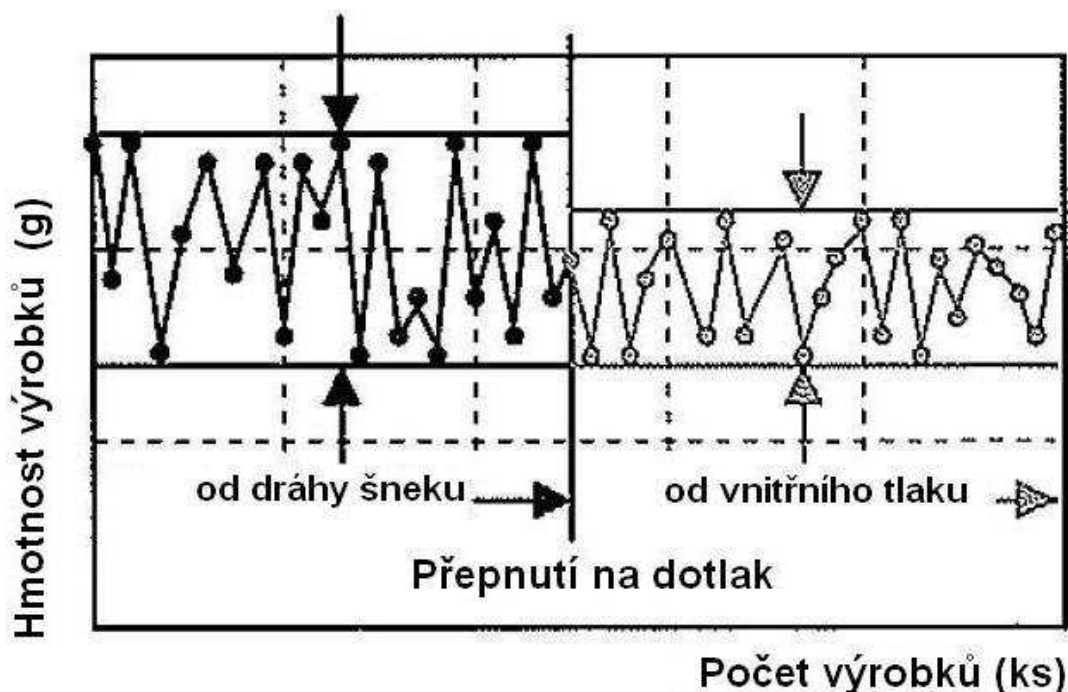
2.5.3 Způsob přepnutí na dotlak a jeho vliv na kolísání hmotnosti vyráběného dílu /11/

Přepnutí na dotlak v závislosti na tlaku uvnitř nástroje představuje změnu ze vstřikovací rychlosti (standardně řízeno polohou šneku, objemem šneku, hydraulickým tlakem nebo časem vstřiku) na dotlakovou fázi, jakmile je dosažena v měřicím místě uvnitř nástroje požadovaná hodnota vnitřního tlaku.

Právě v okamžiku, kdy tavenina dosáhne pozice tlakového snímače, je již možné přepnout na dotlakovou fázi. Důležitá je samozřejmě krátká reakční doba napěťově spínaných součástí vstřikovacího stroje a dobré dynamické chování hydraulického systému stroje. Tyto požadavky jsou zvláště významné v případech, kdy máme umístěný snímač dále od vtokového ústí. Čím vzdálenější pozici pro přepínání na dotlakovou fázi zvolíme, tím vyšší nároky na co nejkratší reakční dobu vstřikovacího stroje budou. Další faktory, které kladou vyšší důraz na co nejkratší reakční dobu, jsou vysoká rychlost vstřikování, vzrůstající odpor proti proudění taveniny nebo vstřikování rozměrově velmi malých výrobků.

Výhoda tohoto způsobu přepínání na dotlak tkví v zužování tolerancí v rámci vstřikovací jednotky s vyloučením vlivu teploty taveniny, které následně vedou ke kolísání času vstřiku a vnitřního tlaku v nástroji. Zároveň je snižován rozptyl ve hmotnosti a rozměrech vstřikovaného dílu. Dále je výhodnější použít tento způsob přepínání pokud dochází ke kolísání dávky, zvláště pokud zpracováváme recyklát, při různé odezvě a opotřebení zpětných ventilů, při kolísání viskozity zpracovávaného plastu a při změnách objemového toku vzhledem k rychlosti pohybu šneku.

Porovnání standardního způsobu přepínání na dotlakovou fázi se způsobem přepínání pomocí vnitřního tlaku v dutině nástroje z hlediska dosahované hmotnostní stability bude také jedním z bodů této disertační práce.

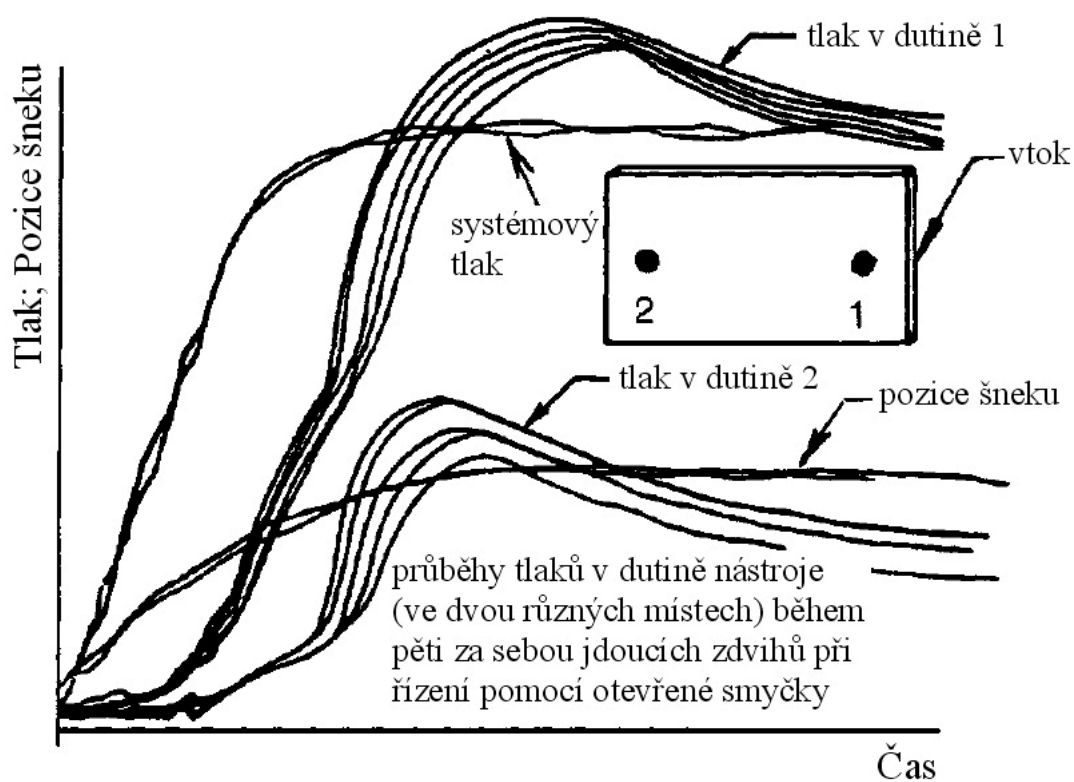


Obr. 33: Kolísání hmotnosti vyráběných dílů v závislosti na zvoleném způsobu přepínání na dotlak /11/

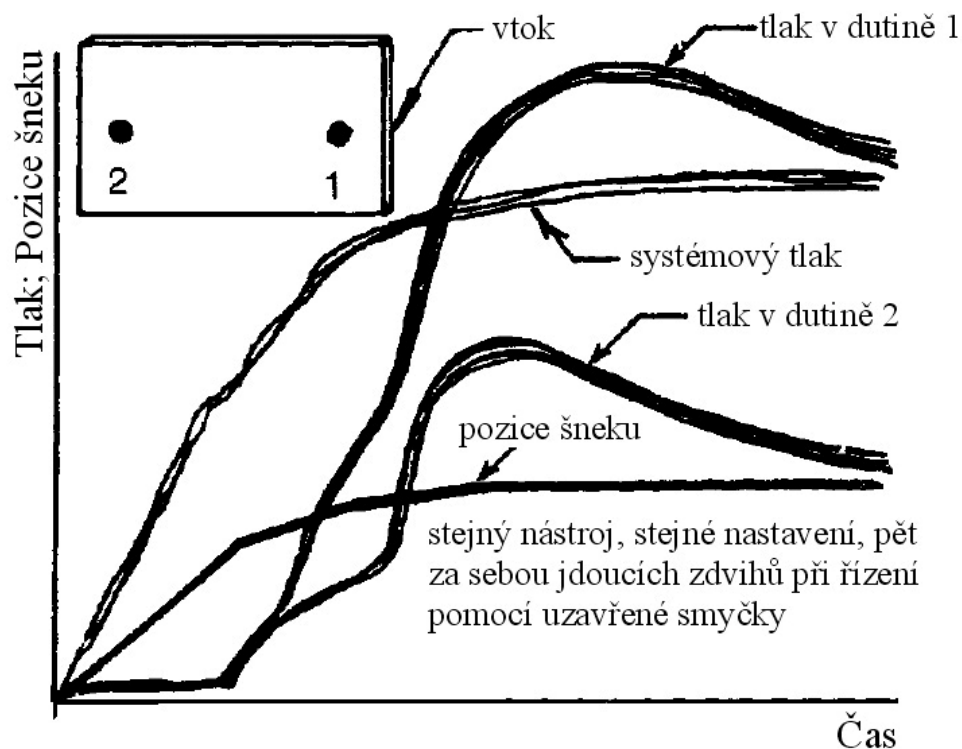
2.5.4 Řízení vstřikovacího procesu pomocí uzavřené a otevřené smyčky

Moderní vstřikovací stroje využívají k řízení vstřikovacího procesu výhradně servořízení s uzavřenými smyčkami. Řízení pomocí uzavřených smyček spočívá v nepřetržitém ověřování regulovaných parametrů zpětnovazebním převodníkem. Dochází tedy k měření skutečné hodnoty řízeného parametru a k porovnání této hodnoty s hodnotou požadovanou, kdy výsledný rozdíl těchto dvou hodnot je využit

ke korekci zadaného parametru. Oproti tomu řízení pomocí otevřené smyčky spočívá nejčastěji v hydraulickém řízení požadovaného parametru pomocí elektrického budicího signálu, ovšem bez zpětné vazby, tedy bez ověření konečného výsledku regulační smyčky a bez korekce skutečné hodnoty parametru. Z obrázků 34 a 35, které zachycují vliv řízení pomocí uzavřených a otevřených smyček na vstřikovací proces je patrné, že výhodnější je používání řízení vstřikovacího procesu pomocí uzavřených smyček, jelikož toto řízení vede k mnohem menšímu kolísání sledovaných veličin a zároveň také k mnohem větší stabilitě výrobního procesu /13/.



Obr. 34: Vliv řízení s otevřenou smyčkou na stabilitu vstřikovacího procesu /13/



Obr. 35: Vliv řízení s uzavřenou smyčkou na stabilitu vstřikovacího procesu /13/

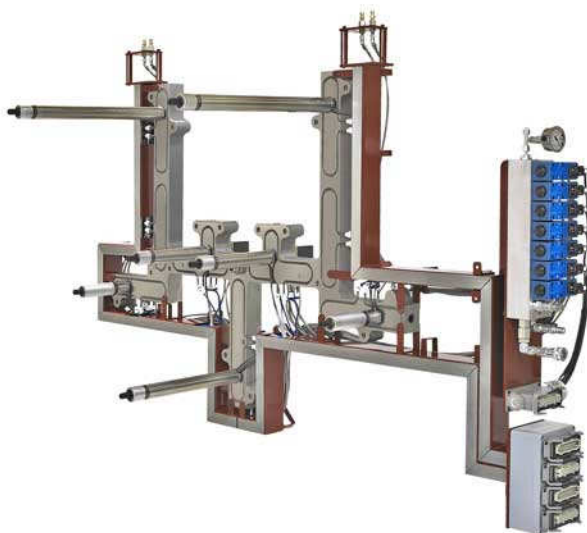
2.6. Vstřikovací nástroje

Vstřikovací nástroj dává po ochlazení tavenině výsledný tvar a rozměry výrobku při zachování správné funkce a splnění požadovaného počtu vyrobených dílů v náležité kvalitě a přesnosti.

Konstrukce vstřikovacího nástroje začíná obdržení 3D dat výlisku s následnou kontrolou jejich správnosti a eventuelním převodem do kompatibilního formátu. Dále se provádí komplexní analýza odformovatelnosti s definováním křivek dělení a určením pevné a odjížděcí strany budoucího nástroje. Následuje aplikace smrštění na obdržená 3D data výlisku a započne modelování dělicí roviny. Dalším krokem je polohování výlisků v nástroji s ohledem na zvolenou vtokovou soustavu a konstruují se případné studené vtokové kanály včetně vyústění. Poté může začít dimenzování jednotlivých částí nástroje jako jsou rámy, tvarové vložky, mechanické čelisti, šikmé i přímé vyhazovače apod. Současně by měla také probíhat konstrukce temperačního systému nástroje s ohledem na co nejrovnoměrnější odvod tepla v systému výstřik - nástroj. Následuje volba středících elementů ve vztahu k velikosti nástroje a příprava umístění příslušenství nástroje pro připojení jednotlivých médií.

Při návrhu vstřikovacího nástroje je třeba dbát na maximální tuhost a pevnost jednotlivých částí nástroje i celku jako takového pro zachycení potřebných

tlaků a rovnoměrný odvod tepla. Důležitý je také výběr vhodného vtokového systému, systému vyhazování a vhodného odvzdušnění dutiny nástroje. Zejména vstřikovací nástroje obsahující vyhřívaný vtokový systém s tryskami a jehlovými uzávěry pro kaskádové vstřikování vyžadují již při návrhu notnou dávku péče při stanovení optimálního počtu vstřikovacích bodů a správném vybalancování horkého rozvodu pro minimalizaci tlakových špiček během plnění dutiny nástroje a co nejrovnoměrnějšímu rozložení tlaků ve výstřiku.



Obr. 36: Vyhřívaný vtokový systém s tryskami a jehlovými uzávěry /10/

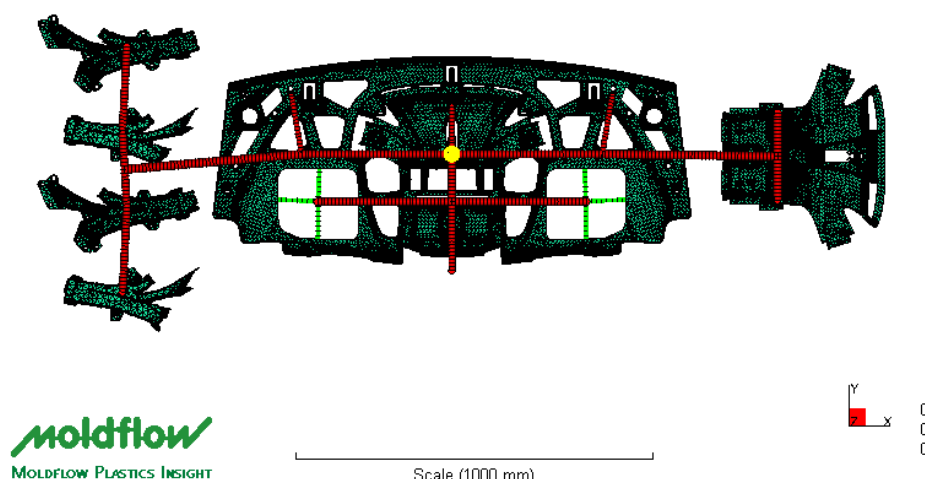
2.7. Kaskádové vstřikování

Kaskádové vstřikování se používá zejména pro výrobu velkoplošných výlisků jako je např. nárazník automobilu a nahradil tak dřívější filmové vtoky a vícebodové vstřikování.



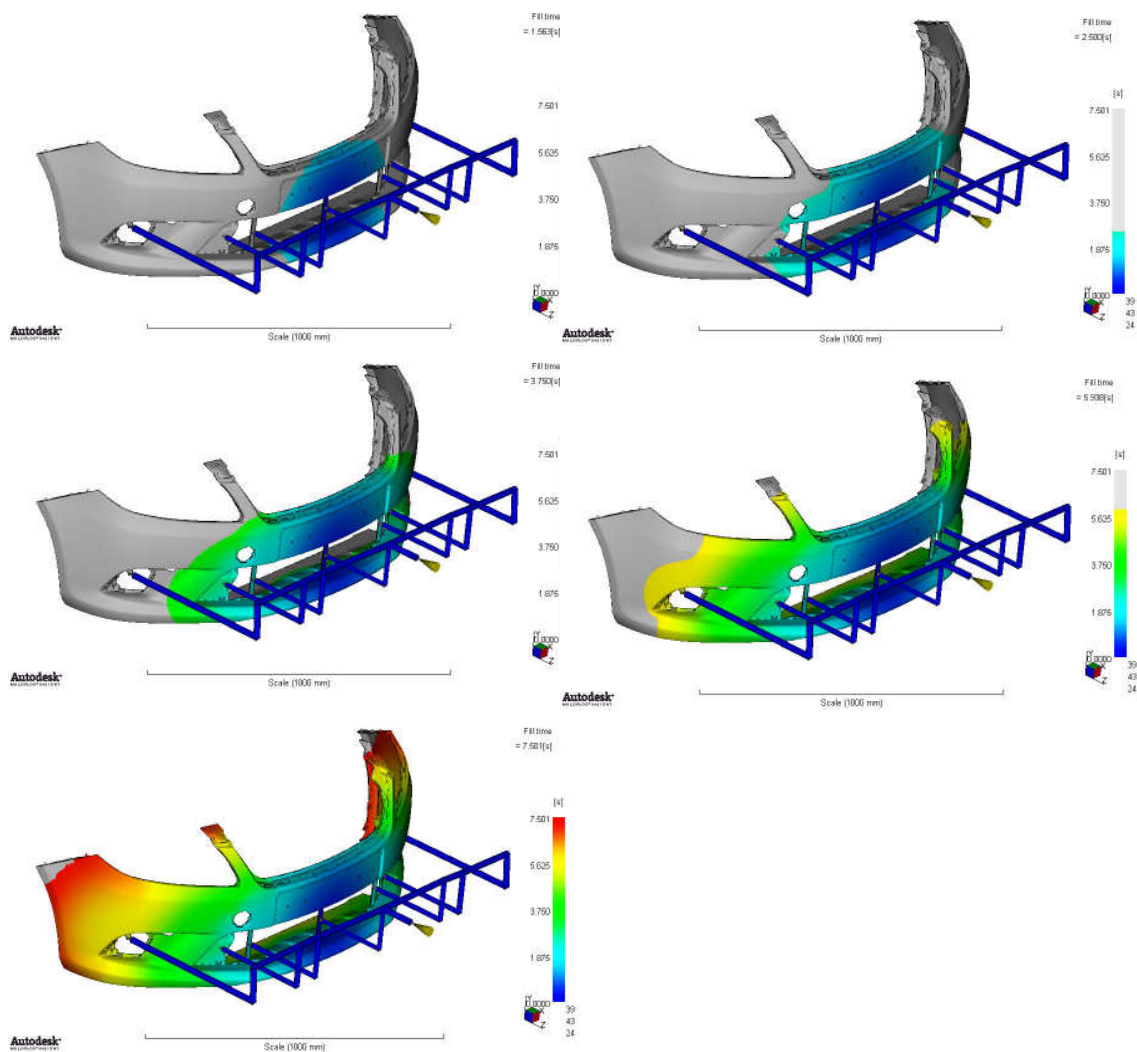
Obr. 37: Nárazník zadní Škoda Octavia – termografický snímek

Nevýhodami těchto dříve používaných systémů byl především velký vtokový zbytek, náročné opracování, studené spoje a u vícebodového vstřikování zejména scházela možnost regulace během vstřikování. Nově se také používá uzavíratelných trysek při stavbě tzv. family nástrojů, které obsahují tvarově a velikostně odlišné díly. Jejich výhodou je výroba různých dílů z jednoho nástroje během jednoho vstřikovacího cyklu. Důležitým faktorem je správný návrh horkého rozvodu z hlediska požadavku na jeho balancování.



Obr. 38: Koncepte family nástroje

Princip kaskádového vstřikování spočívá v postupném plnění dutiny nástroje, kdy s postupujícím čelem taveniny a dosažením oblasti dalších vtokových ústí taveninou, jsou tyto postupně otevírány a navyšuje se tak počet míst, ze kterých tavenina proudí do dutiny nástroje. Největším přínosem této metody je eliminace vzniku studených spojů a také snížení vnitřních tlaků v nástroji během fáze plnění a dotlaku. S postupujícím čelem taveniny resp. délkou toku narůstá vnitřní tlak v nástroji, ale i v horkém rozvodu. S každým otevřením další uzavíratelné trysky dojde k poklesu vnitřního tlaku v dutině a tlaku v rozvodu, neboť narostl počet plnicích míst a navíc v místě otevření trysky tavenina proudí do nástroje při nízké hodnotě tlaku. Tlak opět začne narůstat se vzrůstající délkou toku od místa plnění. Řízení okamžiku otevření trysek je častěji vztaženo k dráze vstřiku, ale může být spjato také přímo s vnitřním tlakem či teplotou taveniny.



Obr. 39: Kaskádové vstřikování

2.8 Problematika zpracování naměřených dat

2.8.1 Aproximace naměřených dat formou funkce /14/, /15/, /16/

Při řešení problematiky zpracování naměřených dat se často setkáváme s úlohou aproximovat tato data formou funkcí. Mezi takové funkce patří polynomy n -tého stupně, trigonometrické polynomy, ale také křivky, jejichž využití řešitel navrhuje na základě zkušeností z předchozího výzkumu. Aproximace interpolačními a trigonometrickými polynomy se ukazuje jako nevhodná pro velké počty naměřených hodnot. /14/

Polynomická regrese představuje proložení neboli aproximaci zadaných hodnot polynomem a jde o zvláštní případ lineární regrese. Koeficienty hledaného polynomu jsou metodou nejmenších čtverců vypočteny tak, aby součet druhých mocnin odchylek původních hodnot od získaného polynomu byl minimální. Na základě porovnání soustav lineárních rovnic odvozených pro aproximaci přímkou a parabolou lze sestavit následující soustavu pro aproximaci polynomem. /15/

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \sum x_i^{2k} & \dots & \sum x_i^{k+1} & \sum x_i^k \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \sum x_i^{k+1} & \dots & \sum x_i^2 & \sum x_i \\ \sum x_i^k & \dots & \sum x_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_k \\ \vdots \\ p_1 \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i x_i^k \\ \vdots \\ \sum y_i x_i \\ \sum y_i \end{bmatrix} = \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (13)$$

Aproximace předpisem typu křivky metodou nejmenších čtverců však často vykazují zásadní disharmonii mezi výraznými faktory naměřených hodnot a předepsanou křivkou, která takto nepostihuje všechny detaily měření. V těchto případech se volí další způsob zpracování pomocí metody tzv. prostých a vážených klouzavých průměrů. /14/

Metoda vyrovnávání pomocí klouzavých průměrů je založena na principu, kde posloupnost empirických pozorování nahradíme řadou průměrů vypočítaných z těchto pozorování. Každý z těchto průměrů tedy reprezentuje určitou skupinu pozorování. Klouzavé průměry dělíme na dvě velké skupiny, prosté klouzavé průměry a vážené klouzavé průměry. Při výpočtu prostých klouzavých průměrů počítáme z dat obsažených v klouzavém intervalu prostý aritmetický průměr, při výpočtu váženého klouzavého průměru přisuzujeme jednotlivým hodnotám v rámci klouzavého intervalu různé váhy. /14/

Velikost periody určuje kolik bodů je pro daný aritmetický průměr použito. Pokud bychom použili jako periodu číslo 1, pak je vlastně použit opět pouze jeden

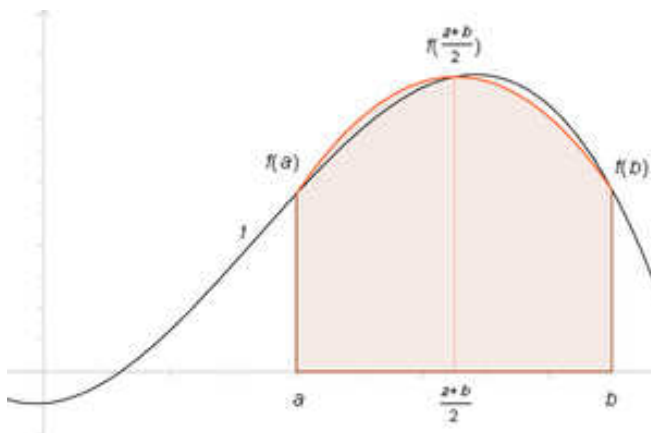
bod, což tedy znamená, že se o průměr nejedná. Výsledkem tedy bude přímka mezi původními body. Pokud bychom použili periodu větší než 1, pak by souřadnice y pro přímku v každém bodě nebyla shodná s y souřadnicí jednotlivých bodů, ale jednalo by se právě o aritmetický průměr z původních bodů. /16/

2.8.2 Výpočet plochy pod křivkou /17/

Jestliže nastala situace, kdy jsou naměřená data aproximována formou nějaké funkce, pak je z hlediska dalšího vyhodnocování a práce s naměřenými daty v popředí zájmu především integrál dané funkce resp. plocha pod křivkou.

Z tohoto hlediska je možno použít řadu metod integrace, kdy asi nejjednodušším je tzv. Riemannův integrál vycházející z představy měření obsahu plochy pod vyšetřovaným grafem funkce. Je založen na vkládání obdélníků do měřené plochy tak, aby se získal dolní a horní odhad a jejich postupným zjemňováním docílilo následně jejich rovnosti a tedy výsledného obsahu měřené plochy. Další metodou je Lebesgueův integrál založený na teorii míry v tomto případě Lebesgueovy míry. Spočívá v dělení oboru hodnot funkce na malé intervaly oproti Riemannovu integrálu, kde se dělí definiční obor. Další možností při výběru vhodného způsobu integrace se nabízí některá z metod numerických integrací, kdy nahrazujeme jiným druhem výpočtu integrál tak, aby chyba výpočtu byla co nejmenší. Výpočet integrálu pomocí některé z numerických metod s výhodou realizujeme pomocí výpočetní techniky a mezi nejjednodušší patří obdélníková, lichoběžníková nebo Simpsonova metoda.

Při Simpsonově metodě numerické integrace je výpočet plochy pod křivkou fce $f(x)$ nahrazen výpočtem plochy pod parabolou proložené třemi body funkce $f(x)$.



Obr. 40: Výpočet plochy pod křivkou pomocí Simpsonova pravidla /17/

Postupujeme tak, že rozdělíme interval $\langle a, b \rangle$ body x_i ,

kde $a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{2r-1} < x_{2r} = b$, na $2r$ stejně velkých podintervalů o

$$\text{velikosti } h = \frac{b-a}{2r} \quad (14)$$

Hodnotu funkce $f(x)$ pro všechna x v podintervalu $\langle x_{2k-1}, x_{2k+1} \rangle$ nahradíme parabolou procházející body $f(x_{2k-1}), f(x_{2k}), f(x_{2k+1})$, tzn.

$$\begin{aligned} f(x_{2k-1}) &= Ah^2 - Bh + C \\ f(x_{2k}) &= C \\ f(x_{2k+1}) &= Ah^2 + Bh + C \end{aligned} \quad (15)$$

kde A, B, C jsou neznámé parametry. Integrál funkce $f(x)$ na intervalu $\langle x_{2k-1}, x_{2k+1} \rangle$ pak

$$\text{můžeme zapsat } \int_{x_{2k-1}}^{x_{2k+1}} f(x) dx \approx \int_{-h}^h (Ax^2 + Bx + C) dx = \frac{h}{3} (2Ah^2 + 6C) \quad (16)$$

Dosadíme-li do tohoto vztahu z předcházejících výrazů a vhodnou změnou indexů

$$\text{dostaneme } \frac{h}{3} (2Ah^2 + 6C) = \frac{h}{3} (f(x_{2k-2}) + 4f(x_{2k-1}) + f(x_{2k})) \quad (17)$$

Integrál funkce $f(x)$ na intervalu $\langle a, b \rangle$ pak můžeme aproximovat vztahem

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x) dx &\approx \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + f(x_2)] + \frac{h}{3} [f(x_2) + 4f(x_3) + f(x_4)] + \frac{h}{3} [f(x_{2r-2}) + 4f(x_{2r-1}) + f(x_{2r})] = \\ &= \frac{b-a}{6r} \{ f(x_0) + 4[f(x_1) + f(x_3) + \dots + f(x_{2r-1})] + 2[f(x_2) + f(x_4) + \dots + f(x_{2r-2})] + f(x_{2r}) \} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\text{Chyba výpočtu je } R_{2r} < \frac{Ds(b-a)^5}{180(2r)^4} < \varepsilon \quad (19)$$

kde $Ds = \max_{a \leq x \leq b} |f^{(4)}(x)|$ a ε je povolená chyba. Na základě požadované přesnosti,

tedy povolené chyby ε , určíme počet intervalů r , na něž je nutno interval $\langle a, b \rangle$ rozdělit, tzn.

$$2r > \sqrt[4]{\frac{Ds(b-a)^5}{180\varepsilon}} \quad /17/ \quad (20)$$

2.9 Hodnocení způsobilosti procesu a analýza rozptylu

/13/,/18/,/19/

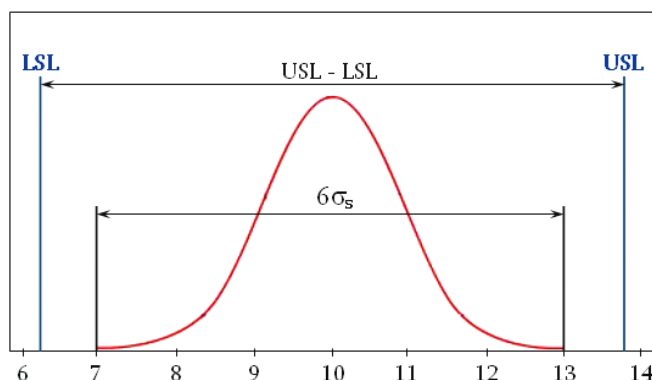
Proces je možno považovat za způsobilý, je-li schopen trvale produkovat výrobky, které vznikají ve stabilních podmínkách zabezpečujících požadovaná kritéria jakosti.

Indexy způsobilosti, které se používají k hodnocení způsobilosti procesu, porovnávají předepsanou maximálně přípustnou variabilitu hodnot danou tolerančními mezemi se skutečnou variabilitou sledovaného znaku jakosti dosahovanou u statisticky zvládnutého procesu. /13/

Jsou definovány dvě základní podmínky, které musí být splněny před vyhodnocením způsobilosti procesu pomocí indexů způsobilosti. První podmínkou je, že hodnocený proces musí být ve statisticky zvládnutém stavu. Pro splnění druhé podmínky musí rozdělení sledovaného znaku jakosti odpovídat normálnímu rozdělení.

Index způsobilosti C_p je mírou potenciální schopnosti procesu zajistit, aby hodnota sledovaného znaku jakosti ležela uvnitř tolerančních mezí. Lze ho stanovit pouze v případech, kdy jsou specifikovány oboustranné toleranční meze. Hodnota indexu C_p je poměrem maximálně přípustné a skutečně dosahované variability hodnot znaku jakosti bez ohledu na jejich umístění v tolerančním poli. Skutečná variabilita sledovaného znaku jakosti je vyjádřena hodnotou $6\sigma_s$, jež v případě normálního rozdělení vymezuje oblast, v níž s 99,73 % pravděpodobností leží všechny hodnoty. /13/

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma_s} \quad (21)$$



Obr. 41: Histogram při výpočtu indexu způsobilosti C_p /18/

Kritický index způsobilosti C_{pk} , na rozdíl od indexu C_p charakterizuje skutečnou způsobilost procesu a zohledňuje nejen variabilitu sledovaného znaku jakosti, ale i jeho polohu vůči tolerančním mezím. Jeho hodnota je poměrem vzdálenosti střední hodnoty \bar{x} sledovaného znaku jakosti od bližší toleranční meze k polovině skutečné variability hodnot. Index C_{pk} lze počítat pro případ oboustranné i jednostranné tolerance. /13/

- předpis dolní toleranční meze

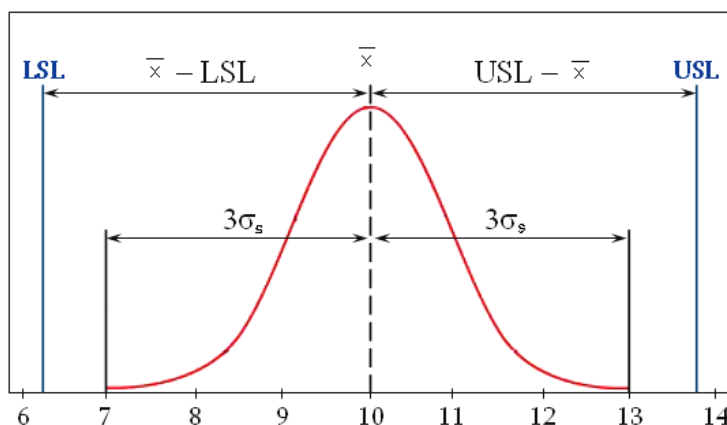
$$C_{pk} = C_{pL} \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma_s} \quad (22)$$

- předpis horní toleranční meze

$$C_{pk} = C_{pU} \frac{USL - \bar{x}}{3\sigma_s} \quad (23)$$

- předpis obou tolerančních mezí

$$C_{pk} = \min \left(C_{pL}; C_{pU} \right) \quad (24)$$



Obr. 42: Histogram při výpočtu kritického indexu způsobilosti C_{pk} /18/

Jelikož každý z indexů charakterizuje způsobilost procesu jiným způsobem a jejich výsledná hodnota nemusí jednoznačně odrážet dané způsobilosti, doporučuje se uvádět jejich kombinace včetně použití grafického zobrazení sledovaného znaku jakosti vůči tolerančním mezím např. pomocí histogramu. V současné době se obvykle považuje proces za způsobilý, když hodnota indexů způsobilosti dosahuje minimálně hodnoty 1,33 ($C_p \geq 1,33$, $C_{pk} \geq 1,33$). /18/



Způsobnost výrobního zařízení se vztahuje k opakovatelnosti produktu vyráběného na výrobním zařízení za stabilizovaných podmínek během kratší doby. Způsob odběru vzorků je největším rozdílem oproti vyhodnocování způsobilosti procesu. V případě vyhodnocování způsobilosti výrobního zařízení se jedná o kontinuální odběr minimálně 50 vzorků vycházejících z procesu. Indexy způsobilosti výrobního zařízení se počítají podle stejných vztahů jako indexy způsobilosti procesu, kdy index způsobilosti výrobního zařízení značíme C_m a kritický index způsobilosti výrobního zařízení značíme C_{mk} . Pakliže jsou splněny obě podmínky ($C_m \geq 1,67$, $C_{mk} \geq 1,67$), můžeme výrobní zařízení považovat za způsobilé.

Pokud jsou pokusy realizovány za stejných podmínek, nemusí se objevit stejné výsledky, ale naopak lze pozorovat jistou proměnlivost. Celková proměnlivost všech výsledků je způsobena nejen působením sledovaných faktorů, ale i neznámých vlivů, které jsou příčinou proměnlivosti výsledků opakovaných za stejných podmínek a které můžeme pokládat za náhodné vlivy. Analýzy rozptylu rozdělí proměnlivost na jednotlivé složky podle jednotlivých činitelů a na složku, která přísluší náhodným vlivům. Pak je možné určit, zda je variabilita hodnot výsledkem působení jednotlivých činitelů, či je pouze důsledkem náhodných vlivů, a tedy variabilita hodnot není významná. /13/

3 Experimentální část

Cílem experimentální části je výzkum nejvhodnějšího procesního pole vstřikování velkorozměrového dílu v závislosti na významných procesních parametrech a na počtu plnicích míst. V první části experimentu byla provedena monitorizace tlakových procesů v závislosti na počtu plnicích míst, době a velikosti dotlaku, vždy s důrazem na výslednou kvalitu vyráběného dílu. S využitím výsledků kvalitativní analýzy byly vymezeny z naměřených tlakových křivek oblasti nastavení daného parametru pro vyrobení dobrého dílu resp. ohraničeny oblasti s výskytem zástříků a oblasti s výskytem propadlin. Hraniční tlakové křivky byly následně matematicky popsány pomocí vhodné regresní analýzy a poté aplikací Simpsonovy metody numerické integrace vypočten obsah plochy pod zkoumanou křivkou. Následně bylo možné kvantifikovat velikost procesní plochy pro vyrobení dobrého dílu, vyhodnocovat vliv jednotlivých proměnných na velikost procesní plochy nebo predikovat u vybraných závislostí vývoj trendu. V další části experimentu bylo prostřednictvím krátkodobé zkoušky způsobilosti procesu analyzováno přepínání na dotlak od dráhy vstřikovací jednotky s přepínáním na dotlak pomocí tlaku uvnitř dutiny nástroje. Pro vstřikování velkorozměrových výrobků byla následně analyzována možnost úplného řízení uzavíratelných trysek pomocí tlaků uvnitř nástroje snímaného sedmi tlakovými snímači. Nedílnou součástí experimentu bylo také vyhodnocení vlivu počtu plnicích míst a měřicího místa pro vybraná nastavení technologických parametrů na homogenitu mechanických vlastností výstřiku.

Po analýze všech dílčích výsledků a vyhodnocení korelace simulací s experimenty byly následně provedeny další simulace za účelem stanovení neoptimálnějšího počtu plnicích míst pro vstřikovací nástroje tohoto typu.

3.1 Charakteristika použitého materiálu

Pro účel experimentu byl použit sériový materiál dodávaný firmou Sabic. Jedná se o směs materiálu Sabic PP 108MF10 a materiálu Sabic PP Compound 20 MBTF. Materiál Sabic PP 108MF10 je blokový kopolymer polypropylenu s vysokou houževnatostí a dobrou a lakovatelností. Sabic PP compound 20 MBTF je koncentrát s vyšší tekutostí obsahující 50% talku. Před samotným zpracováním a smícháním obou materiálů dochází k sušení granulátu po dobu 3 hodin při teplotě 80°C. Pomocí gravimetrického směšovacího zařízení Maguire (viz obr. 43) se připravuje výsledná směs s obsahem talku 10% viz tab.1. V tomto zařízení je každá komponenta vážena s přesností 0,1 gramu.



Obr.43: Gravimetrické směšovací zařízení Maguire

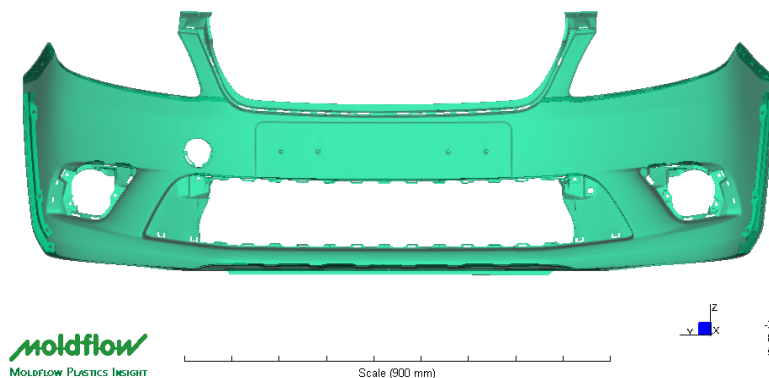
Následuje tabulka s vlastnostmi výsledné směsi materiálu Sabic PP 108MF10 a materiálu Sabic PP Compound 20 MBTF.

Tab. 1. Materiálová data směsi Sabic PP 108MF10 a Sabic PP Compound 20 MBTF

Vlastnost	Hodnota	Jednotka	Norma / Metoda
Hustota	960	kg/m ³	ISO 1183
Smrštění	1,1	%	Sabic metoda
MFR (230 °C, 2,16 kg)	12,3	g/10min	ISO 1133
Mez pevnosti v tahu (50mm/min)	17,0	MPa	ISO 527-2
Modul pružnosti v ohybu při 23 °C (2mm/min)	1200	MPa	ISO 178
Odolnost za tepla dle Vicata A120	130	°C	ISO 306
Teplota tvarové stálosti dle Vicata (0,45 MPa)	100	°C	ISO 75-2
Vrubová houževnatost – metoda Charpy			
Při teplotě – 15 °C	37,7	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Při teplotě 23 °C	57	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Rázová houževnatost – metoda Charpy			
Při teplotě – 15 °C	N	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Při teplotě 23 °C	N	kJ/m ²	ISO 179/1eU

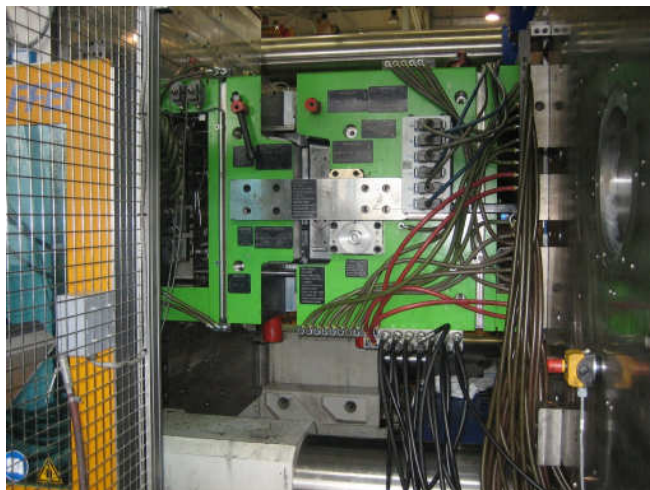
3.2 Vstřikovací nástroj

Jedná se o velkorozměrový vstřikovací nástroj s hmotností 32.250kg pro vstřikování předního nárazníku Škoda Fabia RS FL. Nástroj je jednonásobný a hmotnost vyráběného dílu je 3483g.



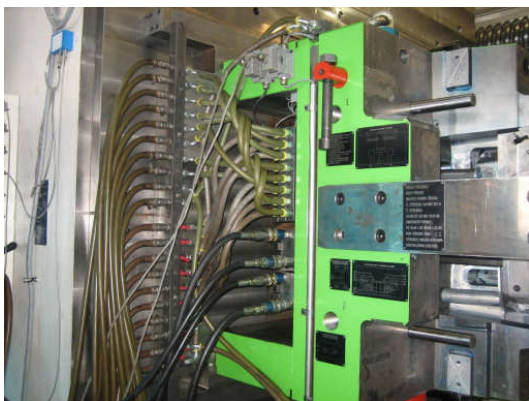
Obr.44: STL model předního nárazníku Škoda A05 RS FL

Vzhledová část nárazníku je umístěna do tvárnice, která je upnuta na pevnou stranu stroje. K této straně stroje přiléhá také vstřikovací jednotka. Nevzhledová strana nárazníku je umístěna na tvárník, který je upnut na pohyblivou stranu stroje. U tohoto nástroje bylo rozhodnuto o vyjímání dílu ze strany tvárníku neboli pohyblivé strany stroje a proto byla konstrukce nástroje uzpůsobena tak, aby během otevírání nástroje vstřikovaný nárazník zůstal na pohyblivé straně a po dokončení odformování byl z této strany vstřikovacího stroje vyjmut manipulátorem. Jelikož je vstřikovaný díl, díky svému designu, v kolizi se stranou tvárnice, bylo nutné při otevírání nástroje použít tzv. nucenou deformaci, kdy se pohybuje současně s otevíráním nástroje také hlavní vyhazovací deska na hodnotu tzv. mezistopu a deformuje díl tak, aby bez poškození mohl překonat podkosové oblasti na straně tvárnice a nástroj mohl být plně otevřen (viz obr. 45). Po plném otevření nástroje následuje dokončení pohybu hlavní vyhazovací desky a poté pohyb dalších tahačů jader, které jsou připojeny na druhý zdvih vyhazování. To má za úkol uvolnit díl z hlavního vyhazování tak, aby převzetí nárazníku manipulátorem bylo snadné a co možná nejrychlejší. Nástroj je, jak z výše uvedeného vyplývá, vybaven dvěma hydraulickými okruhy pro tahače jader.



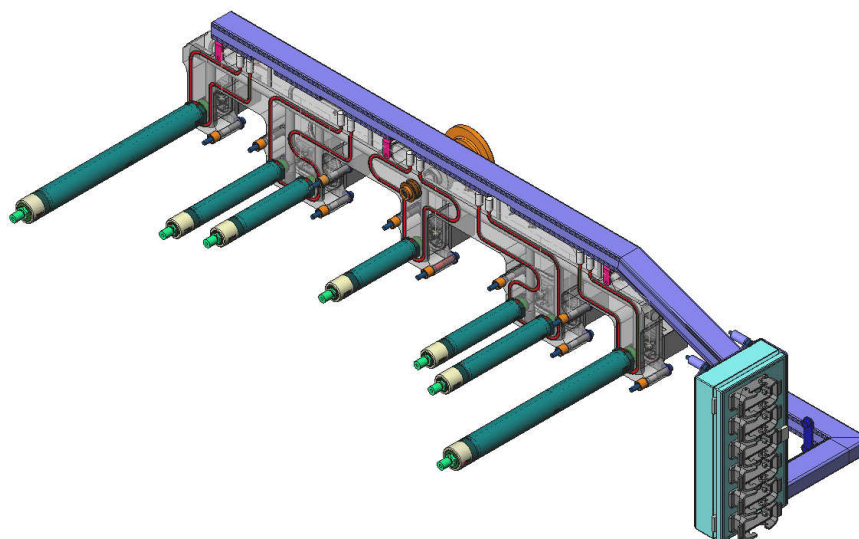
Obr.45: Nucená deformace při otevírání nástroje na hodnotu mezistopu

Chlazení nástroje je realizováno pomocí deseti temperačních okruhů na straně tvárníku a deseti temperačními okruhy na straně tvárnice. Z dalších médií byly již zmíněny dva hydraulické okruhy tahačů jader na straně tvárníku. Dále na straně tvárnice je umístěno sedm hydraulických okruhů pro ovládání jehlových uzávěrů a konektory pro dvacet dva topných pásem vyhřívaného vtokového systému.



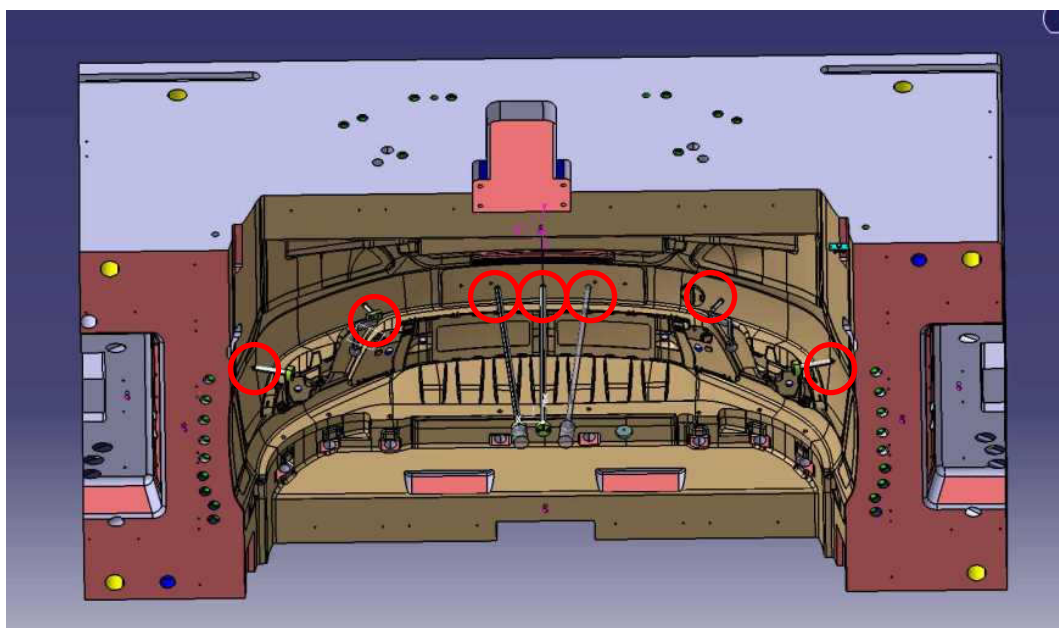
Obr. 46: Pohled na zapojení médií tvárníkové a tvárnice strany

Jelikož se jedná o nástroj, kde se uplatňuje kaskádové vstřikování, je pro rozvod taveniny v nástroji použito vyhřívaného vtokového systému s jehlovými uzávěry. Na základě Moldflow analýzy byl navržen vtokový systém se sedmi uzavíratelnými tryskami (viz obr. 47). Protože byly v minulosti již postaveny obdobné nástroje se třemi resp. pěti uzavíratelnými tryskami, byl tento nástroj vybrán k experimentu záměrně. Bylo tedy možné např. analyzovat vliv počtu plnicích míst na výslednou kvalitu výrobku s vyloučením rozdílností jednotlivých nástrojů.



Obr. 47: Vyhřívaný vtokový systém se sedmi jehlovými uzavěři

Pro možnost monitorizace tlakových průběhů bylo instalováno do nástroje sedm tlakových snímačů typu 6157 BAE (4mm) od fy Kistler. Jejich citlivost je -9,4 pC/bar s rozsahem použití 0-2000bar. Rozložení tlakových snímačů na straně tvárníku je provedeno dle obr. 48. Do pevné části tvárníku byly zabudovány tři tlakové snímače, které vedou uzavřenými kanály a jsou propojeny s jedním centrálním multikonektorem. Další čtyři tlakové snímače byly umístěny do pohyblivých částí tvárníku a pomocí flexibilních odstíněných kabelů typu 1661A byly propojeny s adaptérem s druhým multikonektorem.



Obr.48: Umístění tlakových snímačů

3.3 Vstřikovací stroj

Pro účely experimentu byl použit vstřikovací stroj KM 4000/17200, který je umístěn v nástrojárně společnosti Magna Exteriors & Interiors s.r.o. (Bohemia). Tento stroj byl vyroben roku 2008 a díky svému nadstandardnímu vybavení nebylo třeba rozsáhlých úprav. Primárně je tento vstřikovací stroj určen ke zkoušení nových nástrojů a pro předvývojové aktivity. Základní technické parametry vstřikovacího stroje jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab.2: Technické parametry vstřikovacího stroje KM 4000/17200

Uzavírací jednotka KM 4000		
Rok výroby	2008	-
Systém řízení	MC5	-
Uzavírací síla	40 000	kN
Maximální otevření	4400	mm
Maximální vestavná výška	2050	mm
Velikost upínacích desek (v x š)	3400 x 3100	mm
Světlost mezi sloupky (v x š)	2300 x 2000	mm
Maximální hmotnost nástroje	100 000	kg
Počet topných pásem nástroje	48	ks
Počet temperačních okruhů PS/OS		ks
Počet tahačů jader	10	ks
Počet uzavíratelných trysek	10	ks
Magnetické upínací desky	ano	-
Vstřikovací jednotka KM 17200		
Průměr šneku	150	mm
Dráha dávkování	675	mm
Max. otáčky šneku	104	min ⁻¹

Sušení materiálů zajišťuje podtlakové sušící zařízení fy WSB Maguire. Gravimetrické směšovací zařízení WSB Maguire připravuje směs obou materiálových komponent v požadovaném poměru. Pro temperaci nástrojů je stroj vybaven dvěma temperačními přístroji od firmy Remak. Odebírání výrobků

z nástroje a jejich odkládání na dopravníkový pás obstarává angulární robot Kuka s řízením od firmy KraussMaffei.

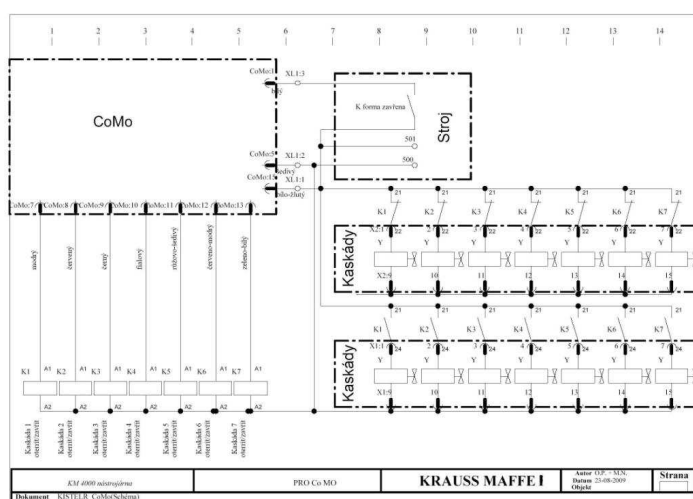
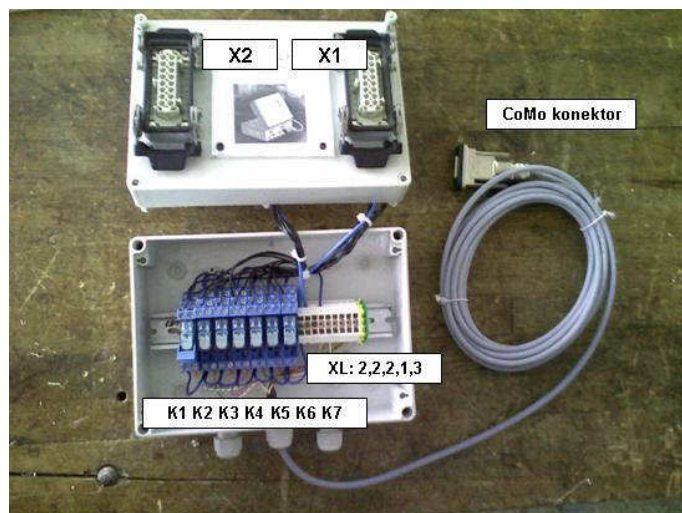


Obr.49: Vstřikovací stroj KM 4000/17200

3.3.1. Úpravy vstřikovacího stroje

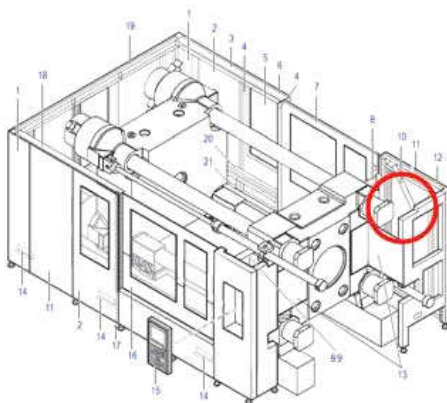
Pro monitorizaci tlakových křivek pomocí jednotky CoMo od fy Kistler bylo třeba připojit tuto jednotku k řízení vstřikovacího stroje tak, abychom mohli využít některého ze standardně generovaných signálů ke spuštění samotného snímání tlakových křivek. Nutnou podmínkou pro následné porovnávání a vyhodnocování jednotlivých křivek bylo obdržení signálu pro start monitorizace vždy ve stejný okamžik. Z tohoto důvodu byl zvolen signál „nástroj uzavřen“ a skrze kabel s 15-ti pinovým a 9-ti pinovým konektorem byl stroj propojen s jednotkou CoMo.

Stejný kabel byl v další fázi experimentu použit také pro ovládání jednotlivých uzavíratelných trysek na základě informací z jednotlivých tlakových snímačů. Zároveň sloužil také pro odeslání signálu pro přepínání na dotlakovou fázi. Během přípravy se ale ukázalo, že jednotka CoMo není schopná napěťovými signály spínat jednotlivé solenoidy ventilů uzavíratelných trysek do pozice „otevřeno“. Ventily pro uzavření trysek jsou v klidovém stavu standardně sepnuty od řízení stroje. Z tohoto důvodu bylo třeba sestavit rozhraní, které bude obsahovat relé pro vybrané trysky a bude schopno na základě signálu z jednotky CoMo přepnout danou trysku z ventilu uzavřeno na ventil otevřeno viz obr.50. Na vstřikovacím stroji bylo dodatečně rozhraní připojeno k uzavíratelným tryskám č.4-10. Uzavíratelné trysky č.1-3 zůstaly spojeny se standardním řízením stroje.



Obr. 50: Rozhraní pro spínání solenoidů na ventilech uzavíratelných trysek

Následně bylo rozhraní instalováno do prostoru médií pro připojení pevné strany nástroje viz obr.51. Standardně je deaktivováno, ale v případě potřeby se pouhým rozpojením dvou konektorů HAN 16 a jejich zapojením do rozhraní toto aktivuje.



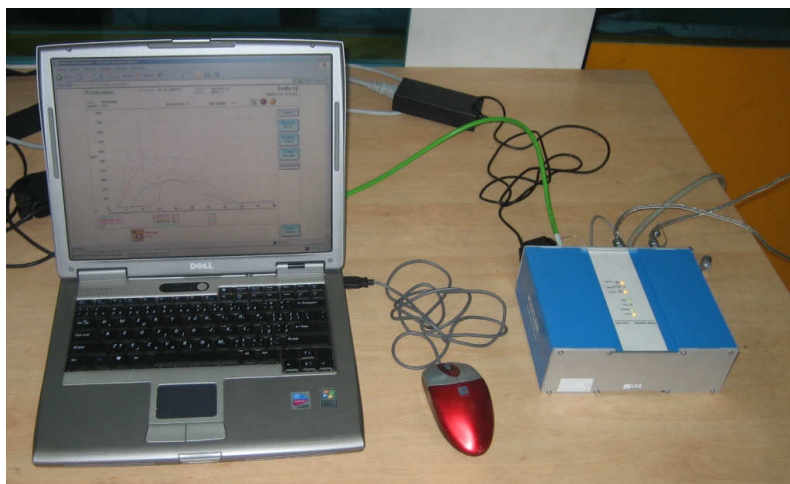
Obr.51: Umístění rozhraní ve stroji

3.4. CoMo jednotka

Vstřikování plastů s pomocí jednotky CoMo je procesním řešením od fy Kistler. Zaměřuje se na monitorizaci, optimalizaci, řízení a dokumentaci vstřikovacího procesu pomocí snímání tlakových průběhů uvnitř nástroje. Tento praktický průmyslový systém je kompaktní a uživatelsky přátelský. Díky velké flexibilitě je použitelný na široké spektrum výrobků a nabízí vysokou přidanou hodnotu v poměru k investovaným nákladům. Nabízí také, díky využití webového prohlížeče, vzdálený přístup k aktuální produkci či statistickým datům vybrané výrobní dávky. Mezi největší přednosti tohoto systému patří:

- analyzování tlakových křivek uvnitř nástroje během procesu vstřikování
- vyhodnocování kvality dílu a následné třídění výrobků, statistika
- nabízí praktické nástroje k optimalizaci procesu a zkracování času cyklu
- Multiflow - umožňuje automatické balancování vyhřívaného vtokového systému vícenásobných nástrojů pomocí kombinovaných snímačů
- umožňuje použití vybraných funkcí v reálném čase k řízení speciálních procesů

Pro účely experimentu byla zapůjčena firmou Kistler CoMo jednotka typu 5865 (viz obr. 52), která je vybavena dvěma multikonektory pro celkem osm tlakových snímačů. Do notebooku byl nainstalován software CoMo MIS a s jednotkou CoMo byl propojen skrze ethernetové rozhraní. Sedm tlakových snímačů v nástroji bylo s jednotkou CoMo propojeno pomocí dvou odstíněných kabelů.

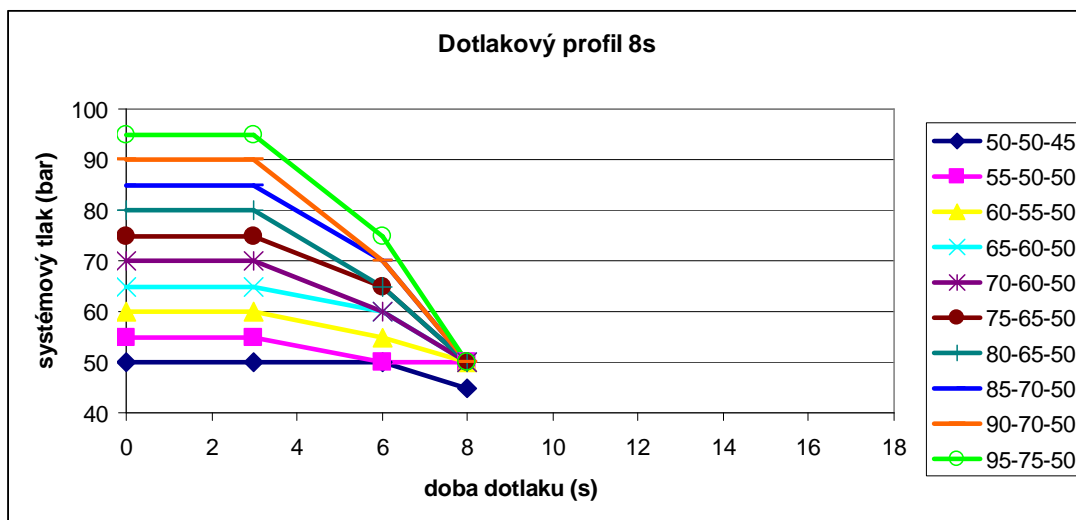


Obr. 52: Jednotka CoMo propojená s notebookem

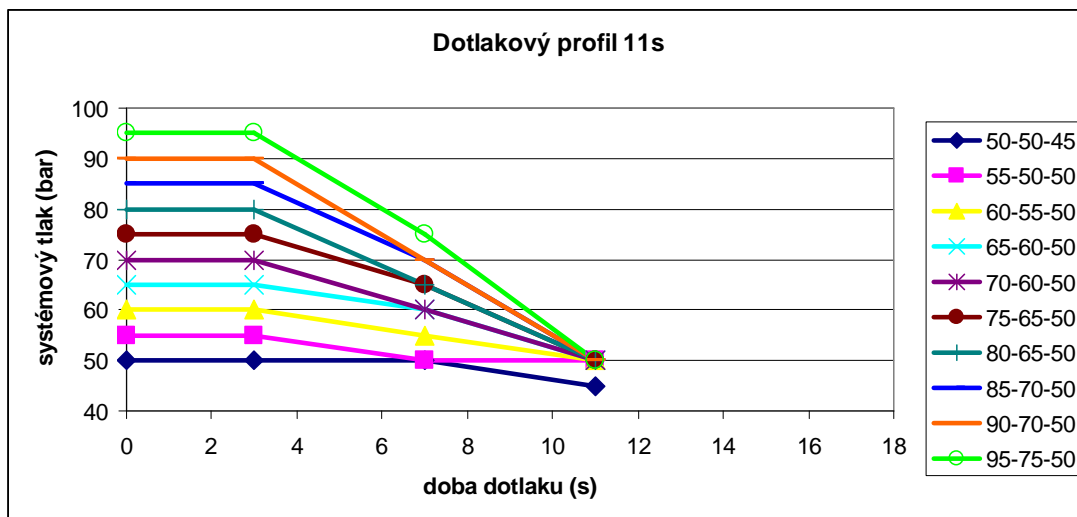
3.5. Nastavení technologických parametrů na stroji při monitorizaci kaskádového vstřikování

Pro první část experimentu, která se týkala monitorizace kaskádového vstřikování, byla fáze vstřiku řízena pomocí rychlostního profilu. Jednalo se tedy o, velmi často v praxi používané, řízení pohybu šneku v závislosti na jeho poloze. To je zajištěno řídicí jednotkou vstřikovacího stroje, která reguluje systémový tlak takovým způsobem, aby bylo dosaženo nastaveného rychlostního profilu.

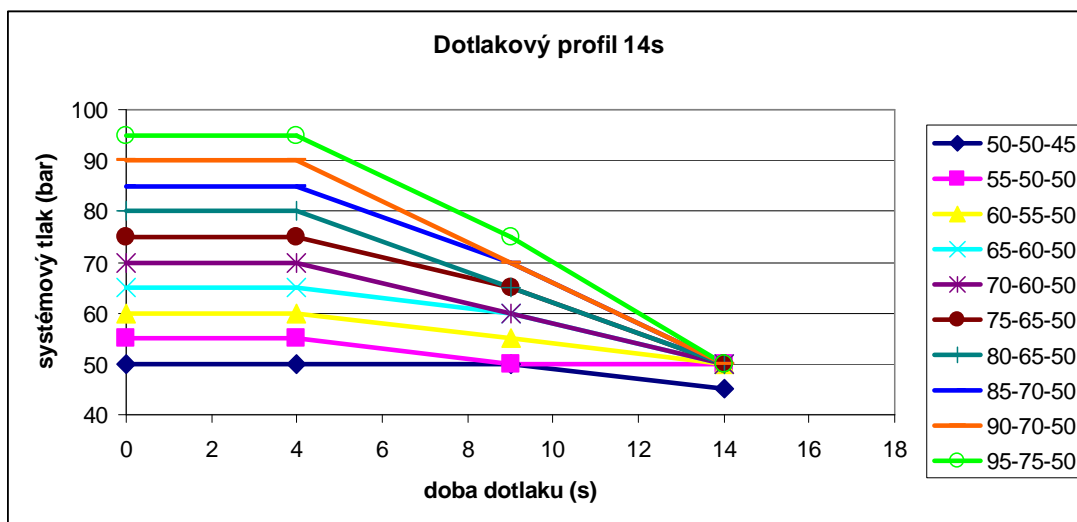
Přepnutí na dotlak bylo nastaveno jako závislá funkce na poloze šneku. Pro účely experimentu byla zvolena dotlaková fáze, jelikož výrazně ovlivňuje průběh vnitřního tlaku v nástroji a zároveň se významně podílí na výsledné kvalitě vyráběného dílu, jak bylo již popsáno v kapitole 2.6.4. Konkrétně se jedná o čtyři různě dlouhé doby dotlaku v kombinaci s deseti různými profily dotlaku. Všechny tyto varianty byly odzkoušeny pro tři rozdílné počty uzavíratelných trysek, což symbolizuje tři rozdílné nástroje. Základní nastavení technologických parametrů je uvedeno v tabulce č.3 a proměnné dotlakové profily na obr. 53-56.



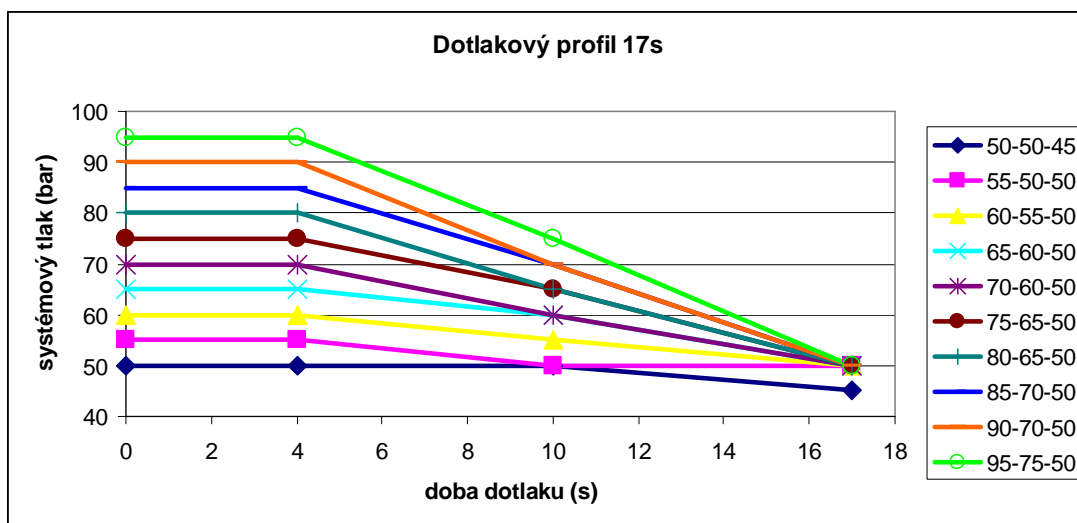
Obr.53: Nastavení profilů dotlaku pro zvolenou dobu dotlaku 8s



Obr.54: Nastavení profilů dotlaku pro zvolenou dobu dotlaku 11s



Obr.55: Nastavení profilů dotlaku pro zvolenou dobu dotlaku 14s



Obr.56: Nastavení profilů dotlaku pro zvolenou dobu dotlaku 17s



Tab.3: Nastavení základních technologických parametrů na stroji KM 4000

Nastavení základních technologických parametrů		
Teploty [°C]	Pod násypkou	40
	Válec	235-230-230-230-220-210-200-190
	Tryska vstřikovací jednotky	240
	Horký rozvod	22x240
	Teplota tvárnice	35
	Teplota tvárníku	30
Tlaky [bar]	Vstřikovací tlak (max.)	142
	Vstřikovací tlak (přepnutí)	126
	Dotlak	proměnná
	Protitlak	10
Dráhy [mm]	Plastikace	330
	Dráha vstřiku	50-100-150-175-230
	Přepnutí na dotlak	85
	Polštář	závislý na proměnných
Časy [s]	Vstřik	7,9
	Dotlak	proměnná
	Plastikace	23
	Chlazení	15
	Cyklus	závislý na době dotlaku
Ostatní	Vstřikovací profil (mm/s)	20-25-28-30-35-40
	Otáčky šneku (1/min)	70
	Uzavírací síla	25000 kN

3.5.1. Nastavení technologických parametrů pro řízení uzavíratelných trysek vyhřívaného vtokového systému

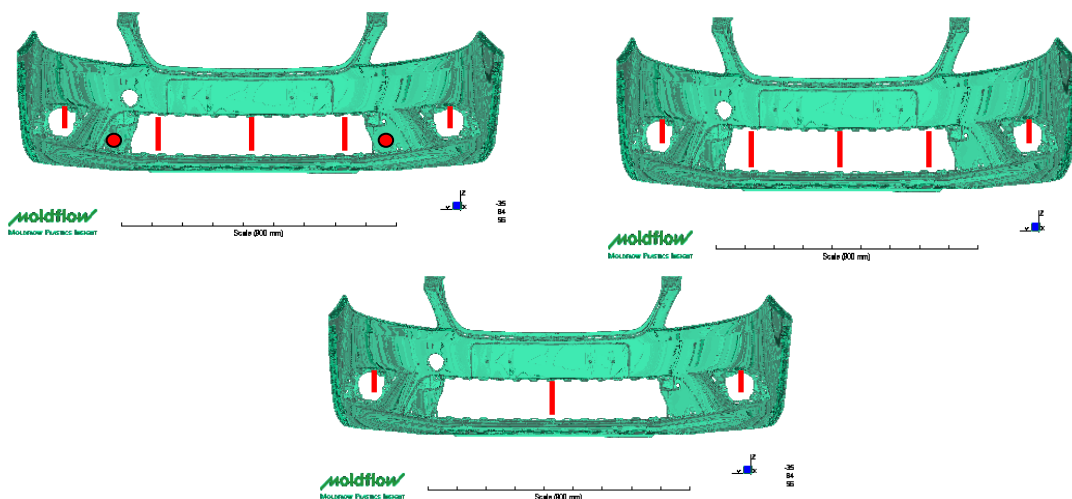
V případě monitorizace tlakových procesů byly uzavíratelné trysky řízeny vstřikovacím strojem. Před samotným spuštěním monitorizace bylo nutné nalézt vhodná nastavení pro otevření a uzavření jednotlivých trysek, což bylo provedeno s pomocí několika postupných testů plnění dutiny nástroje (viz tab.4). Nutno podotknout, že toto nastavení bylo provedeno pro variantu vstřikování s využitím všech sedmi uzavíratelných trysek. Při využití pěti trysek byly nevyužité trysky pouze deaktivovány bez dalších korekcí parametrů v programu, neboť ve fázi plnění dutiny nevykazovaly jednotlivé varianty mezi sebou zásadní rozdíly. Pouze při vstřikování pomocí tří trysek bylo nastavení krajních trysek č.4 a č.10 korigováno na hodnotu otevření 120 mm kvůli pomalejšímu postupu čela taveniny. Všechna vybraná nastavení dotlaku, uvedená v kapitole 3.5., byla použita beze změn pro vstřikování dílu pomocí tří, pěti i sedmi uzavíratelných trysek. Pro lepší představu jsou tyto varianty počtu vstřikovacích bodů znázorněny schematicky na obr. 58.



Obr.57: Číselné označení jednotlivých uzavíratelných trysek nástroje

Tab.4: Nastavení parametrů uzavíratelných trysek řízených strojem KM 4000

Poloha trysky + poloha šneku (mm)	Uzavíratelná tryska						
	4	5	6	7	8	9	10
Otevřít (mm)	132	210	240	400	240	210	132
Zavřít (mm)	0	0	0	0	0	0	0

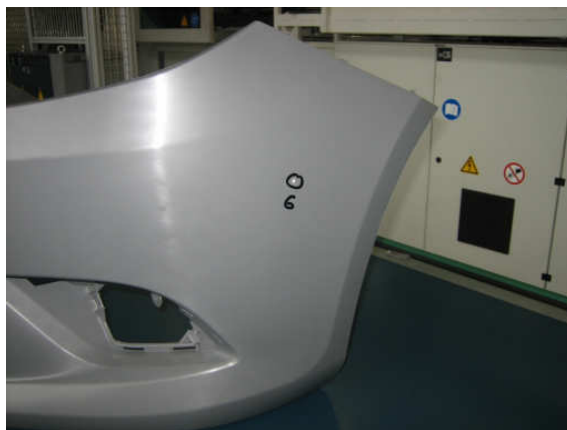


Obr.58: Varianty nástroje s různým počtem vstřikovacích bodů (3-5-7)

3.6. Nastavení technologických parametrů na stroji a jednotce CoMo při tlakovém řízení vstřikovacího procesu

V druhé části experimentu bylo plné řízení vstřikovacího procesu pomocí stroje postupně přesouváno také na jednotku CoMo a stroj pak pro některé parametry plnil pouze příkazy na základě signálů od jednotky CoMo. Nejprve bylo testováno přepínání na dotlak pomocí tlaku uvnitř nástroje. Jak je již uvedeno v kapitole 2.7.3., bývá v odborné literatuře tento způsob přepínání na dotlak označován jako nejpřesnější, ale také technicky nejnáročnější.

Pro přepínání na dotlak byl vybrán v nástroji tlakový snímač č.6 (viz obr.59). Fáze vstřiku zůstala tedy řízena od stroje a po nalezení vhodného okamžiku pro přepnutí byla tato pozice skrze odečtenou hodnotu vnitřního tlaku u zvoleného snímače nastavena jako pozice pro přepnutí na dotlak. V jednotce CoMo byla aktivována funkce threshold pro daný snímač a jednotka vysílala při dosažení nastavené hodnoty vnitřního tlaku impuls do řízení stroje pro přepnutí na dotlakovou fázi. Takto byla vyrobena dávka 50 ks, kdy u každého vyrobeného dílu byla zaznamenána jeho hmotnost za účelem vyhodnocení stability výroby. Pro porovnání byla stejným způsobem vyrobena dávka dílu, kdy přepínání na dotlak bylo řízeno klasicky od polohy šneku. Důležitou podmínkou, pro co nejpřesnější porovnání obou způsobů výroby, bylo přepínat na dotlakovou fázi ve stejný okamžik. Z tohoto důvodu byly porovnány hmotnosti dílů ještě bez dotlaku přímo v momentě přepnutí na dotlak a následně korigovány parametry pro přepnutí, aby některá ze zkoumaných metod nebyla znevýhodněna. Získané údaje o hmotnostech z jednotlivých výrobních dávek byly posléze statisticky vyhodnoceny a porovnány s cílem potvrdit, zda přepínání na dotlakovou fázi pomocí vnitřního tlaku vede k vyšší stabilitě výroby a zužování výrobních tolerancí i u velkorozměrových nástrojů s kaskádovým vstřikováním.

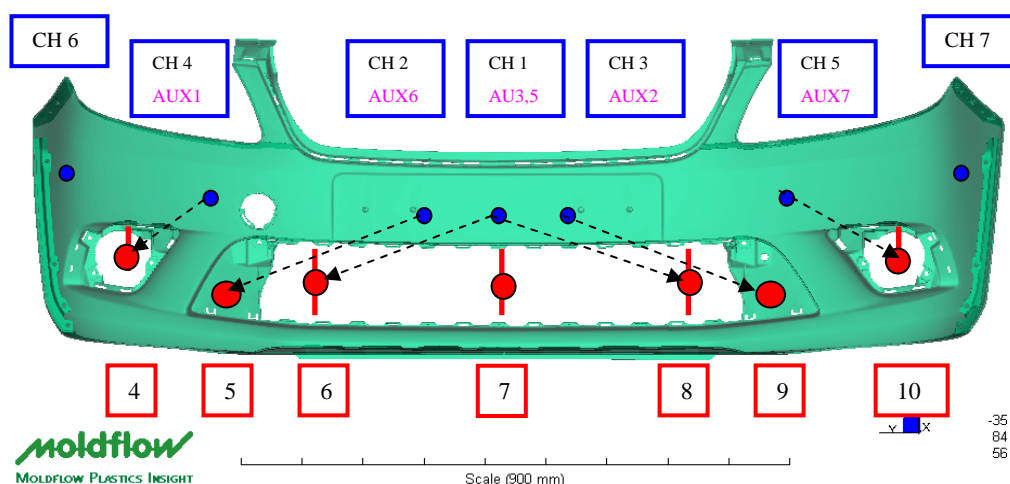


Obr. 59: Tlakový snímač pro přepínání na dotlakovou fázi

3.6.1. Nastavení technologických parametrů pro řízení uzavíratelných trysek vyhřívaného vtokového systému jednotkou CoMo

Pro účel tohoto experimentu byla vybrána varianta vstřikování s využitím všech sedmi uzavíratelných trysek. K řízení uzavíratelných trysek na základě měření vnitřního tlaku v nástroji bylo prvotně použito nastavení uzavíratelných trysek popsanych v kapitole 3.5.1. Pomocí jednotky CoMo byla při řízení

uzavíratelných trysek od stroje nejprve provedena monitorizace tlakových průběhů v jednotlivých měřicích místech. Na základě získaných průběhů proběhlo přiřazení tlakových snímačů a výstupů Aux k jednotlivým uzavíratelným tryškám viz obr.60. Jak je patrné, byla prostřední tryska č.7 vyjmuta z tohoto typu řízení a její otevření bylo ponecháno stroji z důvodu požadavku na otevření první trysky v okamžiku povolení vstřiku, kdy je tlak v dutině nástroje roven 0. Otevření této trysky lze nastavit také pomocí jednotky CoMo, ale pouze díky kontrole času během sledování tlaku, který je v okamžiku otevření trysky stále nulový. Takovéto nastavení by generovalo pouze časové zpoždění a bylo by tedy méně přesné. Proto zůstala tato tryska s výhodou řízena strojem.



- Pozice tlakového snímače / Výstup jednotky CoMo (AUX)
- Uzavíratelná tryska

Obr. 60: Schematické propojení CoMo jednotky a uz. trysek (pohled do tvárnice)

Následně byly stanoveny hodnoty vnitřního tlaku pro otevření jednotlivých trysek. Pomocí funkce Threshold jednotky CoMo byla pro vybraný tlakový snímač zadána hodnota vnitřního tlaku, při jejímž dosažení následovalo otevření dané trysky. K tlakovému snímači byl vybrán zároveň vhodný výstup (Aux) směřující k solenoidu spínané uzavíratelné trysky přes rozhraní, které je popsáno v kapitole 3.3.1. Na obrázku č.61 je uvedeno nastavení funkcí Threshold pro online řízení jednotlivých trysek vstřikovacího nástroje.



Měření
Výr. objednávka: 01
Dávka:
Výrobek: test 4 feb 2010: rs test
Forma: rs: ok
CoMo Inj
17.10.2011 17:51:15

Uživatel: Supervisor
Cyklů: 0
Dobré díly: 0
Špatné cykly: 0

Hranice v reálném čase - přehled nastavení

K.č.	Popis	Mode	Hranice v reálném čase	Směř.	Výst
Y1-1	Ch. 1	RTTH	135.0 bar	↑	Aux 5
Y1-2	Ch. 1	RTTH	135.0 bar	↑	Aux 3
Y2-1	Ch. 2	RTTH	70.00 bar	↑	Aux 6
Y2-2	Ch. 2	vyp			
Y3-1	Ch. 3	RTTH	75.00 bar	↑	Aux 2
Y3-2	Ch. 3	vyp			
Y4-1	Ch. 4	vyp			
Y4-2	Ch. 4	vyp			
Y5-1	Ch. 5	RTTH	110.0 bar	↑	Aux 7
Y5-2	Ch. 5	vyp			
Y6-1	Ch. 6	vyp			
Y6-2	Ch. 6	vyp			
Y7-1	Ch. 7	vyp			
Y7-2	Ch. 7	vyp			
Y8-1	Ch. 4	RTTH	105.0 bar	↑	Aux 1

☐ Vyp
☒ Jednotlivá hra
☐ Zap-Vyp - úroveň

ID výrobku / Popis

Čas / Stop

Hranice v reálném čase

Nastavení / Kompenz. kř.

Změny

Zpět

Aktivuj

Hotovo

Obr. 61: Nastavení funkcí Threshold pro řízení uz. trysek

3.7. Proces měření

Tato kapitola se zabývá stanovením výrobního postupu při experimentech včetně nastavení okrajových podmínek, dále pak samotným průběhem experimentů a následným vyhodnocením získaných dat.

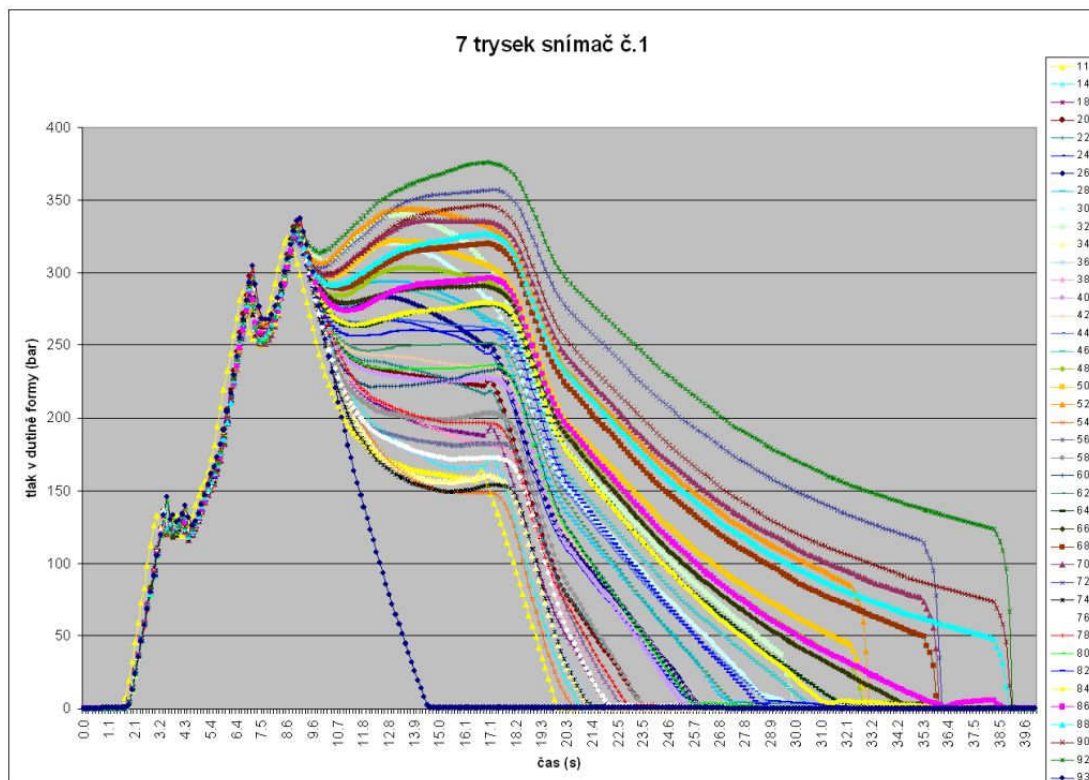
Každý z experimentů byl po nastavení výrobních parametrů zahájen vstřikováním takzvaných „rozjezdových“ kusů, jelikož každý nástroj se musí při započetí výroby tepelně a teplotně ustálit. Předem se tak možným výraznějším odchylkám a chybám ve sledovaných parametrech, které by mohly být zaneseny do experimentu ihned s počátkem jeho realizace. Dle zkušeností u velkorozměrových nástrojů typu nárazníku trvá tepelný náběh cca 10-13 cyklů. Pro účely následujících experimentů byl zvolen start veškerých aktivit po proběhnutí 15-ti cyklů.

3.7.1. Monitorizace kaskádového vstřikování

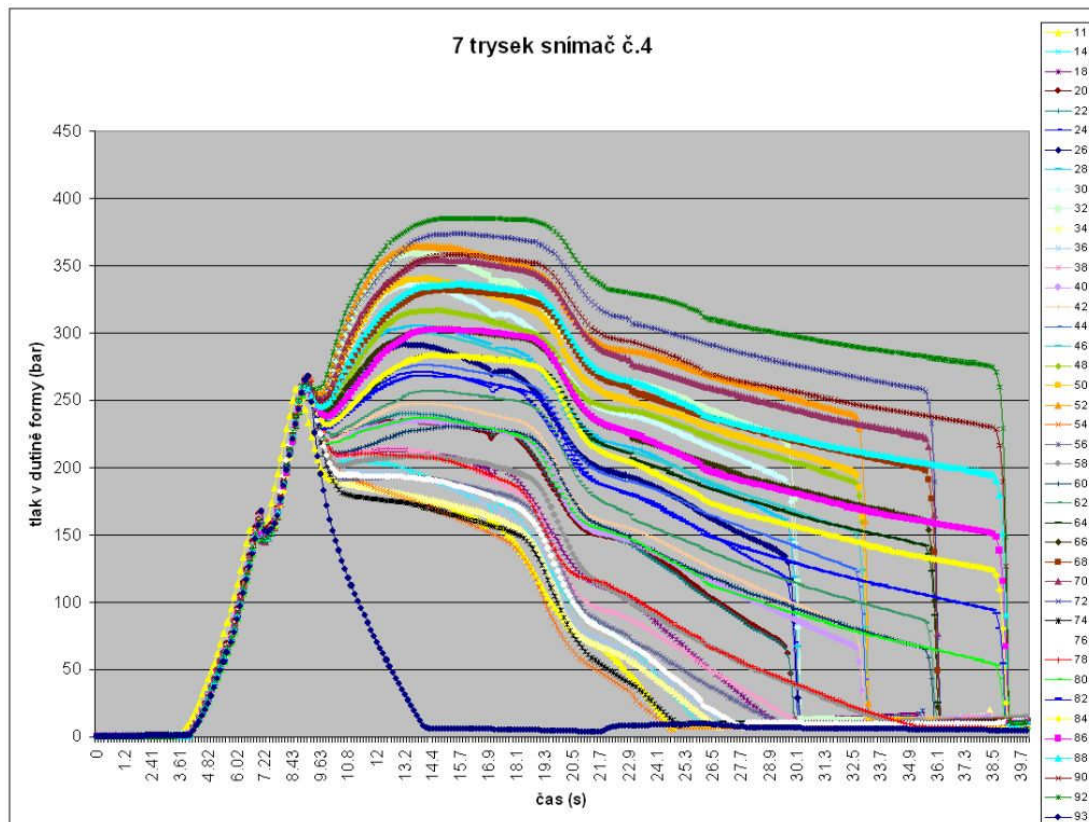
Po nastavení výrobních parametrů popsaných v kapitolách 3.5. a výrobě „rozjezdových“ kusů započala samotná monitorizace.

Jelikož tato část experimentu obsahovala tři základní proměnné a velký počet kombinací, bylo členění experimentu uspořádáno následovně. Jako základní bylo vybráno rozdělení podle počtu uzavíratelných trysek, což může symbolizovat tři tvarově identické nástroje s různým počtem vtoků (3 vtoky – 5 vtoků – 7 vtoků). Na tyto tři základní varianty byly postupně aplikovány čtyři různě dlouhá nastavení doby dotlaku (8s-11s-14s-17s) a pro každou variantu doby dotlaku bylo změřeno deset různých nastavení velikosti dotlaku (viz kap.3.5.). Výroba probíhala z důvodu minimalizace prodlev a zanášení možných chyb pouze v automatickém cyklu s manipulátorem a jediná kolísání času cyklu byla možná pouze díky proměnné době dotlaku.

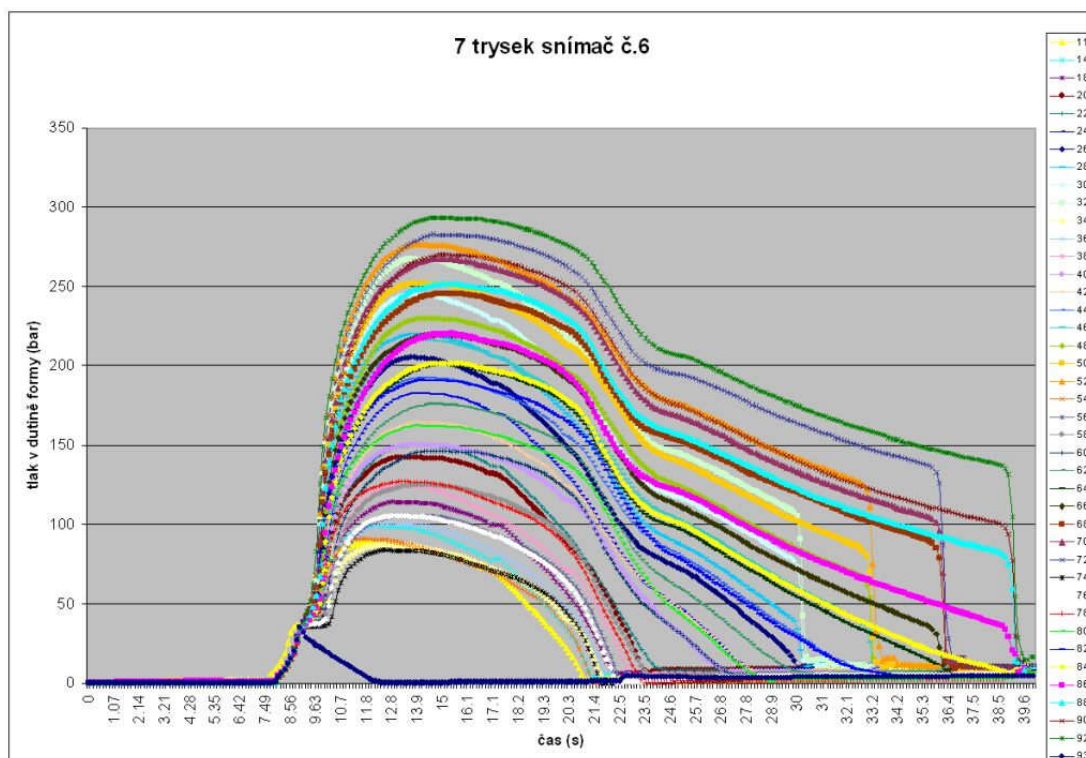
Všechna nastavení variant parametrů se zadávala během výroby, aby stroj vyráběl kontinuálně a nedocházelo k prodlevám. Zadané parametry přebírá stroj okamžitě a jen z důvodu jistoty byly vždy pro každou variantu nastavení vyrobeny dva kusy. Druhý kus po změně nastavení parametrů byl označen jako díl ke kvalitativnímu vyhodnocení a dalším experimentům. Zároveň pro tento díl byly zaznamenány a uloženy k následnému vyhodnocení průběhy vnitřního tlaku všech sedmi tlakových snímačů umístěných v nástroji. Celkem bylo tedy v této fázi vyrobeno cca 250 nárazníků a z toho 123 bylo označeno a odloženo pro kvalitativní hodnocení a následné zkoušky. K těmto 123 dílům bylo nasnímáno a uloženo pro vyhodnocení 861 tlakových křivek. Z důvodu tak obrovského počtu tlakových křivek byl zkoumaný nárazník pomyslně rozdělen v rovině symetrie na polovinu s následným vyhodnocením tří tlakových křivek z každého dílu. Uprostřed nárazníku je umístěn snímač č.1, v oblasti světél nárazníku je umístěn vyhodnocovaný snímač č.4 a na boku nárazníku se jedná o tlakový snímač č.6. Na následující obrázku č.62 jsou pro ilustraci zobrazeny všechny nasnímané tlakové průběhy proměnné doby a velikosti dotlaku v místě snímače č.1 pro variantu sedmi uzavíratelných trysek.



Obr. 62: Tlakové křivky monitorované snímačem č.1 pro variantu sedmi uz. trysek



Obr. 63: Tlakové křivky monitorované snímačem č.4 pro variantu sedmi uz. trysek



Obr. 64: Tlakové křivky monitorované snímačem č.6 pro variantu sedmi uz. trysek

Obdobným způsobem byly vyneseny do grafu tlakové křivky pro oblast snímače č.4 a č.6 na obrázcích č.63 a č.64. Během monitorizace byla každá jednotlivá varianta nastavení parametrů označena číslem, jak je patrné např. z legendy obrázku č.62. Stejným číslem byl označen i příslušný vyrobený nárazník pro kvalitativní vyhodnocení. Následně byly zpracovány analogicky tlakové křivky pro variantu pěti resp. tří uzavíratelných trysek. Pro lepší orientaci je v příloze práce umístěna také převodní tabulka s nastavením sledovaných parametrů pro jednotlivá čísla dílů.

3.7.2. Analýza získaných dat během monitorizace

Z naměřených tlakových křivek vyplývá, že nejvyšší hodnota vnitřního tlaku 513 bar byla naměřena během fáze vstřiku tlakovým snímačem č.1 u varianty vstřikování pomocí tří uzavíratelných trysek. Při použití pěti trysek byla ve fázi vstřiku naměřena špičková hodnota 363 bar a u varianty sedmi uzavíratelných trysek vnitřní tlak ve fázi vstřiku vystoupal na hodnotu 336 bar. Tyto výsledky souvisí s tokovou dráhou, kterou musí tavenina urazit, než dojde k otevření další postupové

trysky. Zatímco u varianty pěti trysek i sedmi trysek vzniká tlaková špička až na samém konci vstřiku, kdy je dutina téměř naplněna, tedy v momentě přepnutí na dotlakovou fázi, tak u varianty tří trysek vzniká výrazná tlaková špička těsně před otevřením krajních trysek, neboť toková dráha od střední trysky je příliš dlouhá. Platí tedy, čím delší dráha toku, tím vyšší hodnota vnitřního tlaku naměřená snímačem č.1 viz obr. č.65. Při použití lineární regrese je také z obrázku patrné, že největší tlakový spád se vyskytuje u varianty tří trysek, čemuž odpovídá i nejvyšší záporná hodnota směrnice přímky. Co se týče dotlakové fáze, byly při zvoleném maximálním dotlakovém profilu naměřeny následující hodnoty. Pro variantu tří trysek vystoupala hodnota na 397 bar, při použití pěti trysek na 380 bar a při otevření sedmi trysek byl naměřen tlak 375 bar. Rozdíly nejsou již tak markantní a způsobují je pravděpodobně tlakové ztráty ve vstřikovacím systému při rozdílném počtu vstřikovacích bodů.

Tab.5: Vybrané hodnoty vnitřního tlaku naměřené snímačem č.1

počet trysek (ks)	Tlaková maxima (bar)		
	fáze vstřiku	dotlaková fáze (maximální)	dotlaková fáze (minimální)
3 trysky	513	397	183
5 trysek	363	380	154
7 trysek	336	375	164

Pro oblast tlakového snímače č.4 se situace obrátila. Nejvyšší tlak během vstřikovací fáze byl naměřen u varianty sedmi trysek a to 268 bar. U Varianty pěti trysek tlak vystoupal na 227 bar a nejnižší tlak 160 bar byl zaznamenán u varianty tří trysek. To je jednoznačně způsobeno počtem trysek, které tuto oblast ovlivňují viz obr. č.66. V dotlakové fázi výsledky vykazují obdobný trend, jako ve fázi vstřiku. Pro nejvyšší nastavený dotlakový profil byla zaznamenána nejvyšší hodnota tlaku 385 bar u varianty sedmi trysek. Následuje verze pěti trysek s naměřenou hodnotou 346 bar a nejnižší hodnota 280 bar byla zaznamenána při použití pouze tří trysek. Právě tato varianta, jak je z výše uvedeného patrné, je v této oblasti tlakově poddimenzována. Při použití nižších dotlakových profilů, kdy se hodnota vnitřního tlaku v tomto místě pohybovala pod 160 bar, nebylo dostatečně kompenzováno objemové smrštění, což vedlo ke zvýšenému výskytu propadlin. Naproti tomu je třeba také zmínit, v souvislosti se snímačem č.4, dosaženou hodnotu 385 bar v dotlakové fázi u varianty sedmi trysek. Tato hodnota byla již vyšší, než hodnota

naměřená u snímače č.1. To souvisí s vyšším počtem trysek ovlivňujících tuto oblast. Pokud vezmeme navíc v úvahu, že místo měření snímače č.4 je o cca 30% více vzdáleno od nejbližší trysky než je tomu u snímače č.1, pak je nutné konstatovat, že tato oblast je pro variantu sedmi trysek již tlakově předimenzována. Navíc pro nižší dotlakové profily naměřený rozdíl mezi místem č.4 a č.1 ještě více vzrůstá v neprospěch místa č.1.

Tab.6: Vybrané hodnoty vnitřního tlaku naměřené snímačem č.4

počet trysek (ks)	Tlaková maxima (bar)		
	fáze vstřiku	dotlaková fáze (maximální)	dotlaková fáze (minimální)
3 trysky	160	280	53
5 trysek	227	346	104
7 trysek	268	385	160

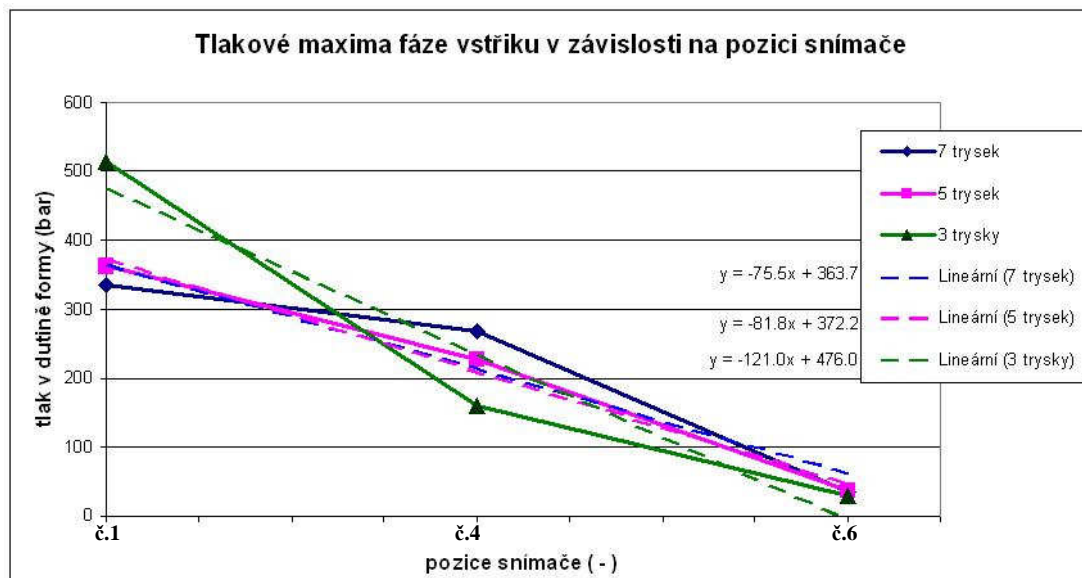
Pro oblast tlakového snímače č.6 byly naměřeny ve fázi vstřiku následující hodnoty. V případě použití sedmi trysek vystoupal vnitřní tlak v okamžiku přepnutí na dotlak na hodnotu 34 bar. U varianty pěti trysek bylo naměřeno 36 bar a při použití tří trysek bylo zaznamenáno 29 bar. Tyto nízké hodnoty jsou zapříčiněny přepínáním na dotlakovou fázi v momentě, kdy je dutina nástroje zaplněna z cca 98%. Nedochází tedy ve fázi vstřiku k zaplnění 100% objemu dutiny nástroje ani k nástupu kompresní fáze. Tento přístup byl v experimentu zvolen záměrně, aby se jednotlivé zkoumané dotlakové profily mohly výrazněji projevit a aby byl jejich vliv na výslednou kvalitu dílu lépe patrný a vyhodnotitelný. V technické praxi se tento způsob často využívá a to zejména k eliminaci nedostatků vstřikovacích nástrojů, které by kompresní fáze v oblasti vstřiku jenom zvýraznila. Jak je dále patrné, jsou naměřené špičky ve fázi vstřiku značně vyrovnané. To je z části výsledkem snahy o sjednocení momentu přepnutí na dotlak ve stejný okamžik pro všechny varianty počtu trysek tak, aby některá z variant nebyla znevýhodněna. Způsob nastavení momentu přepnutí byl již popsán v kapitole 3.6. V dotlakové fázi byla pro variantu sedmi trysek naměřena nejvyšší hodnota 293 bar, pro variantu pěti trysek vystoupal vnitřní tlak na hodnotu 302 bar a u nastavení pomocí tří trysek byla nejvyšší zaznamenaná hodnota 300 bar. Při porovnání variant počtu uzavíratelných trysek vztahujících se ke snímači č.6 se ukázalo, že snímané tlakové špičky jsou bez výrazných rozdílů nejen ve fázi vstřiku, ale také v dotlakové fázi, jelikož tryska

nejvíce ovlivňující tuto oblast je společná pro všechny varianty a tudíž celkový rozdílný počet uzavíratelných trysek nástroje nehraje v této oblasti významnou roli.

Tab.7: Vybrané hodnoty vnitřního tlaku naměřené snímačem č.6

počet trysek (ks)	Tlaková maxima (bar)		
	fáze vstřiku	dotlaková fáze (maximální)	dotlaková fáze (minimální)
3 trysky	29	300	80
5 trysek	36	302	88
7 trysek	34	293	88

Nicméně jedná se prozatím pouze o úsekové hodnocení na základě vybraných naměřených hodnot. Komplexnější představu nabízí porovnání získaných velikostí procesních ploch, které vychází z kvalitativního hodnocení dílů popsaném v následující kapitole.



Obr. 65: Tlaková maxima fáze vstřiku v závislosti na poloze tlakového snímače

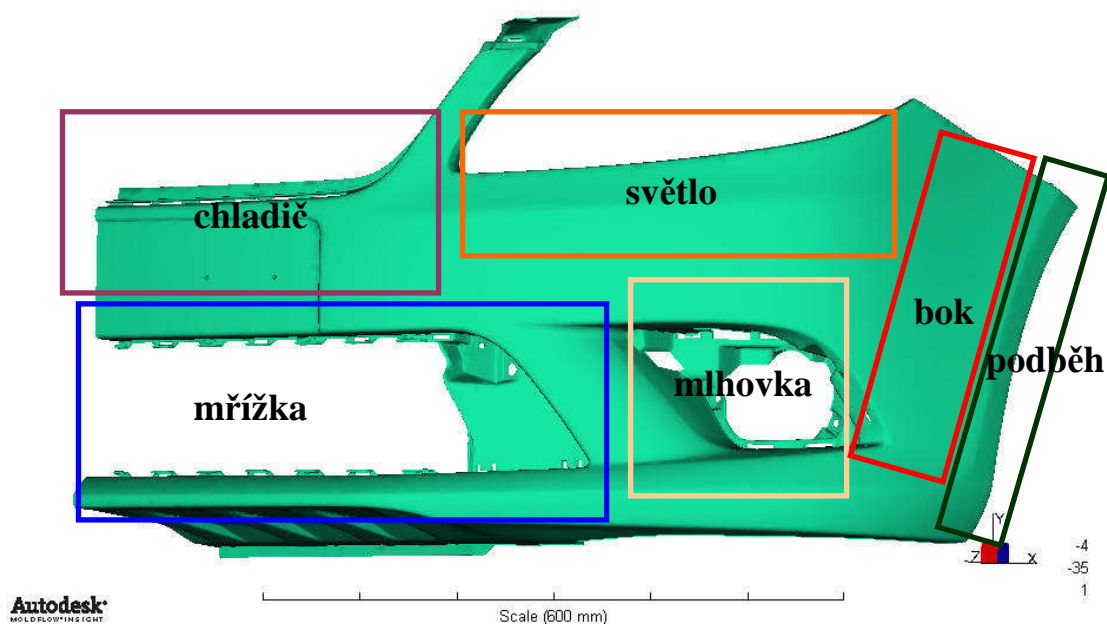


Obr. 66: Tlaková maxima fáze vstřiku v závislosti na počtu uzavíratelných trysek

Ze závislosti na obr. 66 vyplývá, že nejméně vyhovující je z hlediska tlakových poměrů uvnitř nástroje varianta tří trysek. Jako neoptimálnější z hodnocených se jeví varianta pěti trysek, jelikož u varianty sedmi trysek je tlakově předimenzována oblast v okolí snímače č.4 a tlaková špička v okolí snímače č.1 není výrazně nižší v porovnání s variantou pěti trysek. To je způsobeno nerovnoměrným rozložením trysek. Při předpokladu rovnoměrného umístění uzavíratelných trysek je možno usuzovat, že by varianta sedmi trysek byla ze zkoumaných variant neoptimálnější.

3.7.3. Kvalitativní vyhodnocení

Po dokončení monitorizace započalo kvalitativní hodnocení vyrobených 123 nárazníků. Jak již bylo v předchozí kapitole popsáno, z důvodu obrovského počtu tlakových křivek, byla vybrána k hodnocení pouze polovina nástroje. Konkrétně se jednalo o levou stranu nárazníku (uvažováno z pohledu řidiče). Dále byla zvolená polovina nárazníku rozdělena na šest sektorů a každá z těchto oblastí byla zvlášť hodnocena na výskyt propadlin, vlasových zástříků a zástříků nebo byla oblast vyhodnocena jako kvalitativně akceptovatelná a byla označena zkratkou OK.



Obr. 67: Schematické rozdělení nárazníku ne sektory pro kvalitativní hodnocení

Jednotlivé výsledky byly pro každý nárazník zapisovány do tabulky tak, aby byl v každém řádku vyhodnocen jeden nárazník s určitým nastavením parametrů. Poté bylo sestaveno dvanáct kvalitativních tabulek se základním členěním dle počtu uzavíratelných trysek a s podružným členěním podle doby dotlaku. Následují čtyři tabulky pro variantu sedmi uzavíratelných trysek. Zbýlé jsou opět k nahlédnutí v příloze disertační práce. Pro názornost je zde nejprve uvedena klasifikace vad spjatých s legendou kvalitativního hodnocení dílů.



Obr. 68: Propadlina



Obr. 69: Vlasový zástřík



Obr. 70: Zástřík

Legenda - propadlina vlasový zástřík zástřík

Tab.8: Kvalitativní hodnocení dílů (doba dotlaku 8s)

číslo dílu	profil dotlaku	chladič	mřížka	mlhovka	světlo	bok	podběh
11	50 50 45	ok	ok	ok	ok	p	ok
14	55 50 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
18	60 55 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
20	65 60 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
22	70 60 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
24	75 65 50	ok	ok	v	v	p	ok
26	80 65 50	ok	ok	v	v	ok	ok
28	85 70 50	ok	ok	v	v	ok	ok
30	90 70 50	ok	ok	z	z	ok	v
32	95 75 50	v	ok	z	z	ok	v



Tab.9: Kvalitativní hodnocení dílů (doba dotlaku 11s)

číslo dílu	profil dotlaku	chladič	mřížka	mlhovka	světlo	bok	podběh
34	50 50 45	ok	ok	ok	ok	p	ok
36	55 50 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
38	60 55 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
40	65 60 50	ok	ok	ok	ok	ok	ok
42	70 60 50	ok	ok	ok	ok	ok	ok
44	75 65 50	ok	ok	v	v	ok	ok
46	80 65 50	ok	ok	v	v	ok	ok
48	85 70 50	ok	ok	v	z	ok	ok
50	90 70 50	v	ok	z	z	ok	v
52	95 75 50	v	ok	z	z	ok	z

Tab.10: Kvalitativní hodnocení dílů (doba dotlaku 14s)

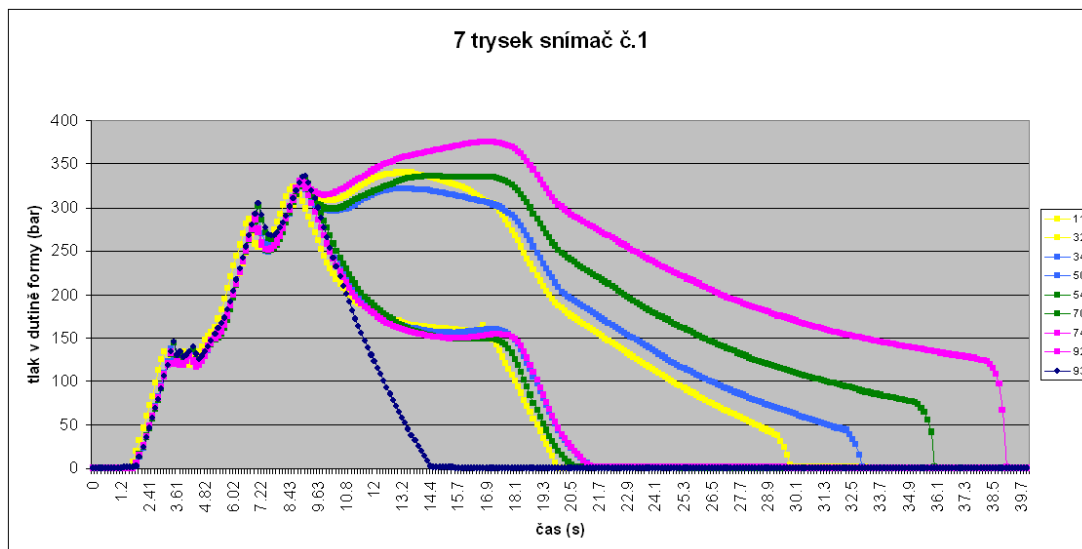
číslo dílu	profil dotlaku	chladič	mřížka	mlhovka	světlo	bok	podběh
54	50 50 45	ok	ok	ok	ok	p	ok
56	55 50 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
58	60 55 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
60	65 60 50	ok	ok	ok	ok	ok	ok
62	70 60 50	ok	ok	ok	v	ok	ok
64	75 65 50	ok	ok	v	v	ok	ok
66	80 65 50	ok	ok	v	z	ok	v
68	85 70 50	ok	ok	z	z	ok	v
70	90 70 50	v	ok	z	z	ok	z
72	95 75 50	v	ok	z	z	ok	z

Tab.11: Kvalitativní hodnocení dílů (doba dotlaku 17s)

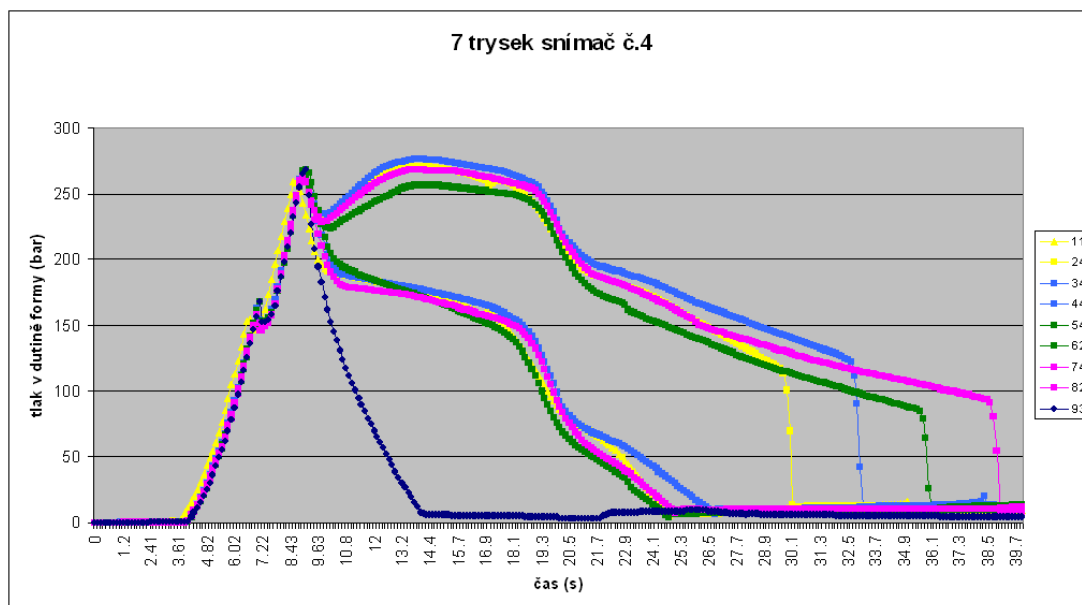
číslo dílu	profil dotlaku	chladič	mřížka	mlhovka	světlo	bok	podběh
74	50 50 45	ok	ok	ok	ok	p	ok
76	55 50 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
78	60 55 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
80	65 60 50	ok	ok	ok	ok	ok	ok
82	70 60 50	ok	ok	v	v	ok	ok
84	75 65 50	ok	ok	v	v	ok	ok
86	80 65 50	ok	ok	z	z	ok	ok
88	85 70 50	ok	ok	z	z	ok	v
90	90 70 50	ok	ok	z	z	ok	z
92	95 75 50	v	ok	z	z	ok	z

Kvalitativní vyhodnocení bylo poté přeneseno do grafů obsahujících tlakové průběhy následujícím způsobem. V každé z kvalitativních tabulek byla pro oblast příslušného tlakového snímače vybrána hraniční oblast s posledním výskytem propadlin a oblast s prvním výskytem vlasových zástřiků. Výběrem tedy jsou dvě čísla vyrobených nárazníků, kterým odpovídají určitá nastavení doby i velikosti dotlaku. Oblast mezi těmito nastaveními představuje pole bez výskytu vad. Tento výběr byl přenesen do příslušných grafů tlakových průběhů, jak je vidět na

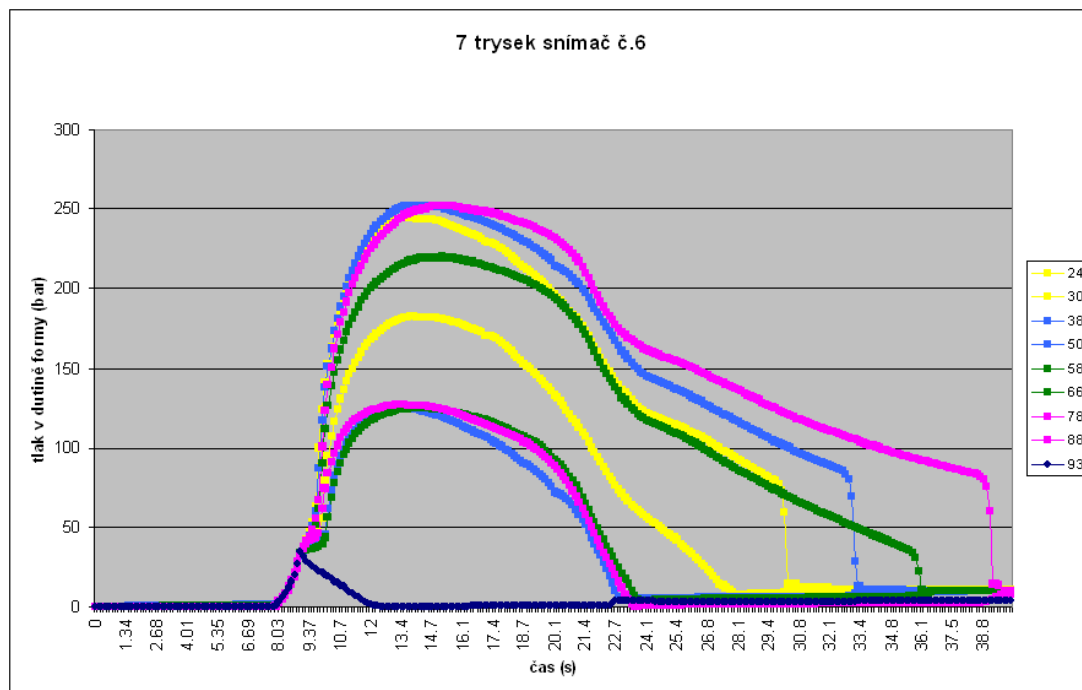
následujících obrázcích pro variantu sedmi trysek. Analogicky byly vyhodnoceny a sestaveny grafy pro variantu pěti trysek a tří trysek. Ty jsou opět uvedeny v příloze disertační práce.



Obr. č.71 Vybrané tlakové průběhy vymezující oblast bez vad pro snímač č.1



Obr. č.72 Vybrané tlakové průběhy vymezující oblast bez vad pro snímač č.4

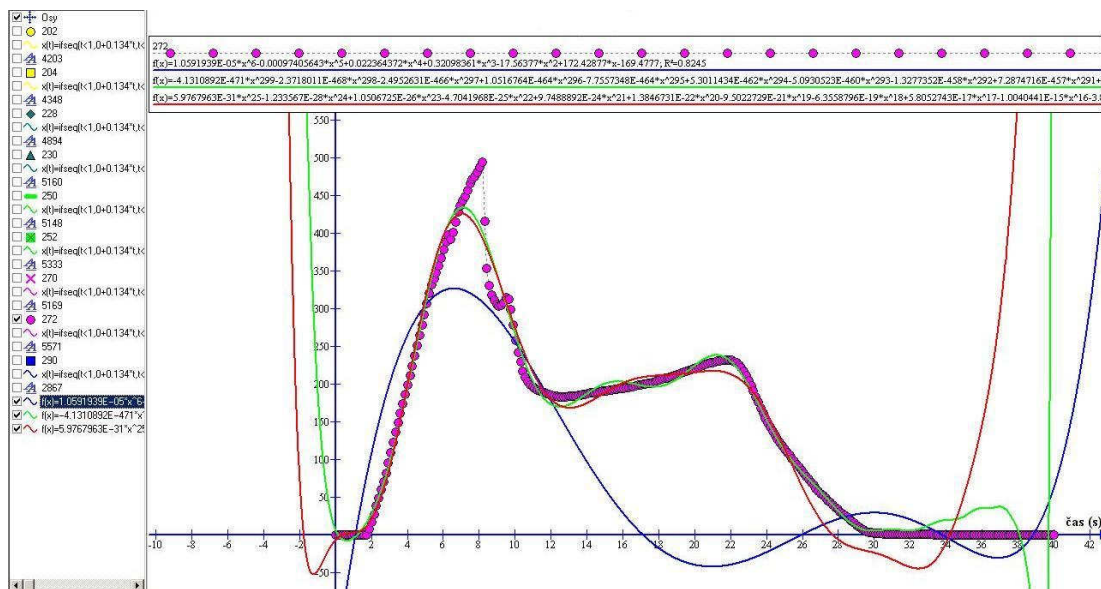


Obr. č.73 Vybrané tlakové průběhy vymezující oblast bez vad pro snímač č.6

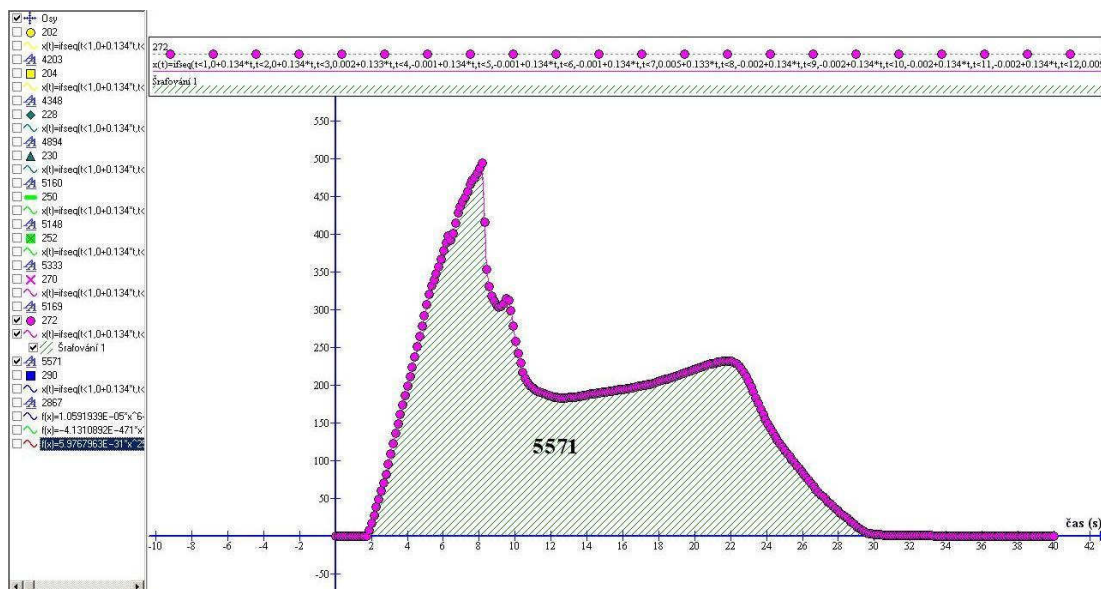
3.7.4. Regresní analýza vybraných tlakových průběhů

Po uspořádání tlakových průběhů bylo třeba jednotlivé křivky matematicky popsat, aby bylo poté možné provést výpočet plochy pod křivkou. Standardní polynomičká regrese v programu Microsoft office Excel dosahuje maximálního stupně šest, který však vykazoval zásadní disharmonii s reálným průběhem křivky. Proto bylo nutné využít některý ze specializovaných programů. Takovým je i program Graph verze 4.3. Jedná se o freeware program jehož autorem je Ivan Johansen a je primárně určený k vykreslování grafů matematických funkcí v souřadném systému jako jsou explicitní funkce, parametrické a polární funkce, posloupnosti bodů a práce s nimi. Umožňuje také import a export dat z ostatních aplikací jako je Microsoft Excel. Vložení naměřených dat do programu Graph bylo provedeno pomocí funkce import posloupnosti bodů ve formátu *.txt. Je třeba dodat, že každá z importovaných křivek byla popsána pomocí 299 bodů. Poté bylo nutné vybrat vhodnou metodu regrese tak, aby co nejlépe vystihovala naměřený průběh vnitřního tlaku v dutině nástroje. Na následujících obrázcích jsou uvedeny příklady vložených regresních křivek, kde pro polynomičskou regresi byly postupně zadány stupně 6, 25 a 299. Jelikož i při vysokém polynomičském stupni vykazovala regresní křivka disharmonii s vloženou datovou řadou, byla jako nejvhodnější (viz obr. 74)

zvolena metoda vyrovnávání pomocí klouzavých průměrů, kdy jako perioda bylo vybráno číslo jedna a tím je regresní křivka identická s křivkou původní. Následně bylo možno i pro tento typ regrese využít integrovaného výpočtu obsahu funkce, jak je patrné na obr. 75.



Obr. 74: Vložení polynomicke regrese 6-tého, 25-tého a 299-tého stupně



Obr.75: Vyrovnávání pomocí klouzavých průměrů s periodou = 1

Všechny vybrané tlakové průběhy vymezující vzájemně oblast bez vad byly podrobeny vyrovnání pomocí metody klouzavých průměrů a následně byla pro každý průběh pomocí Simpsonovy metody numerické integrace vypočtena plocha

pod křivkou. Jelikož tato hodnota pro případ disertační práce slouží pouze jako srovnávací, byla označena jako bezrozměrná. V dalším kroku došlo k porovnání získaných ploch tak, aby výsledná rozdílová plocha reprezentovala oblast bez výskytu vad, tedy plochu procesního okna pro nastavení zkoumaných parametrů k dosažení výroby dobrého dílu. Níže je umístěna tabulka, která obsahuje vypočtené plochy a dále příslušné rozdíly ploch pro jednotlivé oblasti snímačů.

Tab.12: Tabulka ploch vymezující oblast výskytu dobrých dílů

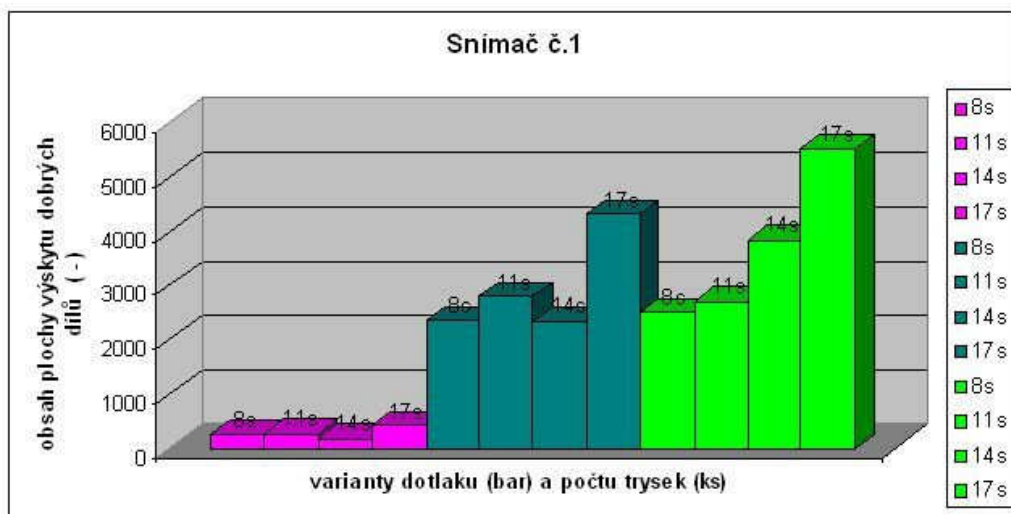
Snímač č.1		8s		11s		14s		17s		bez dotlaku
7 trysek	číslo dílu	11	32	34	50	54	70	74	92	93
	plocha	3098	5616	3220	5934	3135	6973	3150	8667	2158
	rozdíl		2518		2714		3838		5517	
5 trysek	číslo dílu	112	130	132	148	152	164	172	188	191
	plocha	3154	5514	3394	6186	3410	5758	3435	7751	2124
	rozdíl		2360		2792		2348		4316	
3 trysky	číslo dílu	202	204	228	230	250	252	270	272	290
	plocha	4203	4348	4894	5160	5148	5333	5169	5571	2867
	rozdíl		145		266		185		402	

Snímač č.4		8s		11s		14s		17s		bez dotlaku
7 trysek	číslo dílu	11	24	34	44	54	62	74	82	93
	plocha	2752	5008	2848	5619	2608	5370	2656	6010	2158
	rozdíl		2256		2771		2762		3354	
5 trysek	číslo dílu	112	120	132	142	152	160	172	178	191
	plocha	1924	2830	2036	3822	2021	3318	2052	3145	910
	rozdíl		906		1786		1297		1093	
3 trysky	číslo dílu	208	214	232	236	254	260	274	282	290
	plocha	1521	2198	1575	1780	1440	2141	1441	2550	603
	rozdíl		677		205		701		1109	

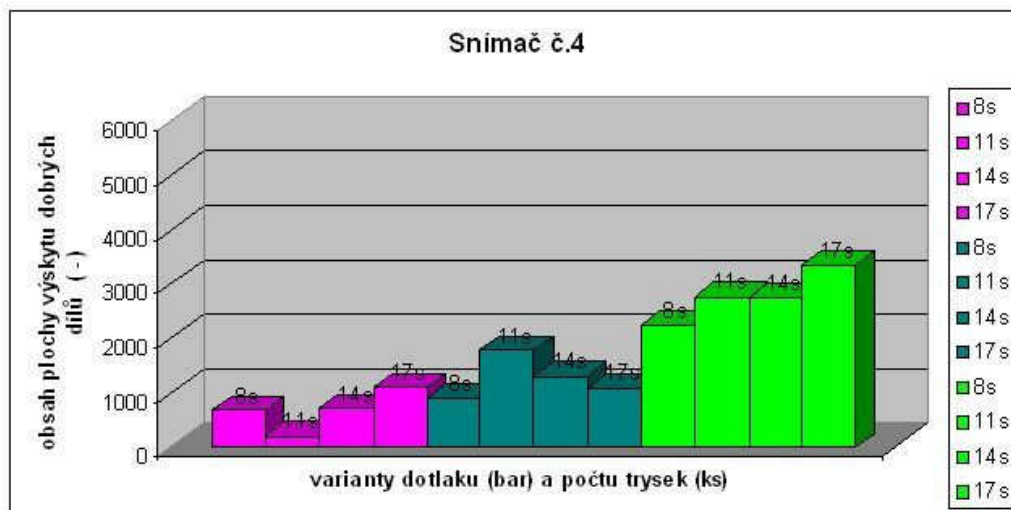
Snímač č.6		8s		11s		14s		17s		bez dotlaku
7 trysek	číslo dílu	24	30	38	50	58	66	78	88	93
	plocha	2195	3579	1256	4172	1365	3608	1372	4956	63
	rozdíl		1384		2916		2243		3584	
5 trysek	číslo dílu	120	128	136	146	156	168	176	184	191
	plocha	1776	3972	1467	3929	1467	5328	1468	3994	59
	rozdíl		2196		2462		3861		2526	
3 trysky	číslo dílu	210	224	232	246	254	264	274	282	290
	plocha	1352	3147	1322	4798	1207	4294	1258	3554	24
	rozdíl		1795		3476		3087		2296	

Na základě výsledků uvedených v tabulce č.12 byly vyhodnoceny dosažené hodnoty následujícím způsobem. Nejprve jsou uvedeny tři grafy obsahující rozdílové hodnoty ploch s hlavním členěním dle daného tlakového snímače a podružným členěním dle doby použitého dotlaku.

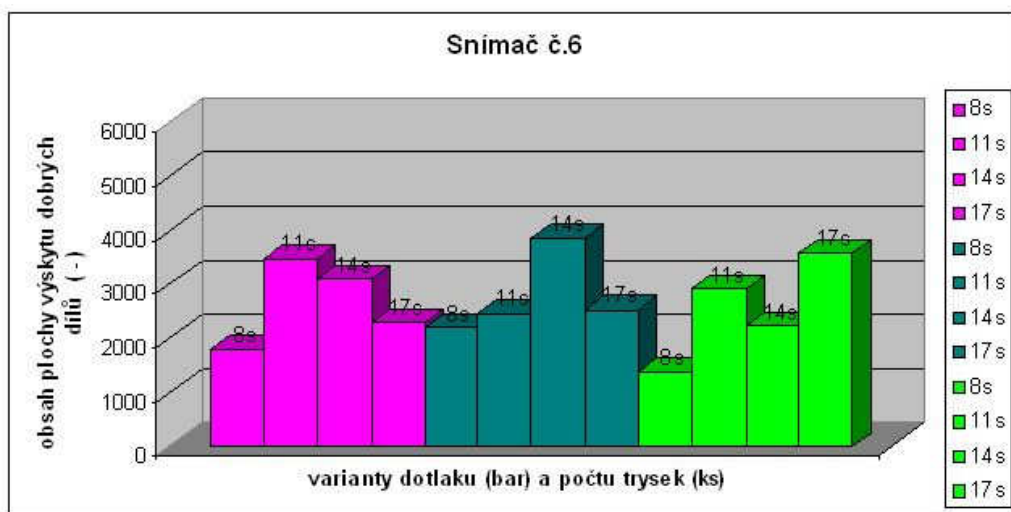
Legenda k následujícím obrázkům: ■ - 3 trysky ■ - 5 trysek ■ - 7 trysek



Obr.76: Výsledné procesní plochy pro oblast tlakového snímače č.1



Obr.77: Výsledné procesní plochy pro oblast tlakového snímače č.4



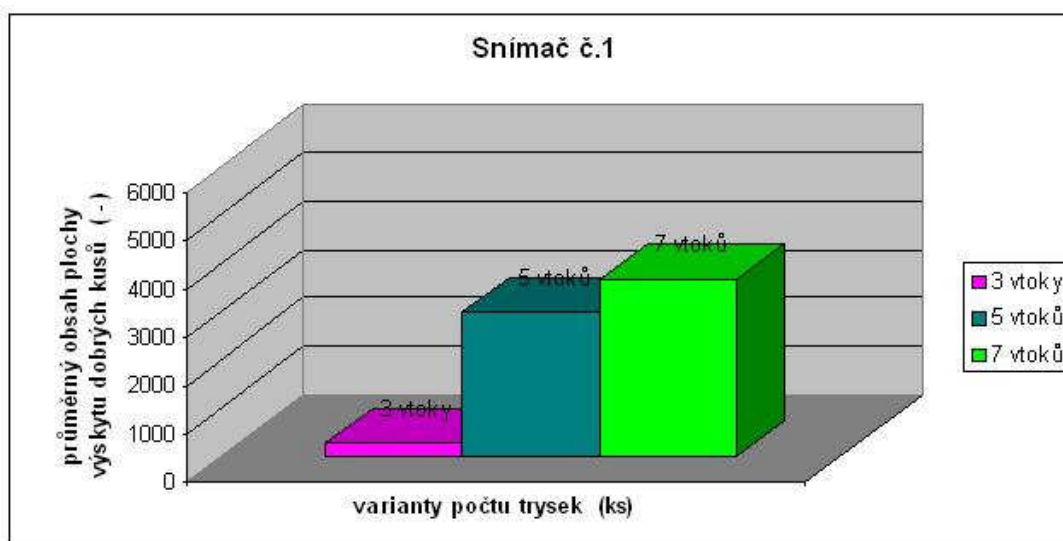
Obr.78: Výsledné procesní plochy pro oblast tlakového snímače č.6

U snímače č.1 je nejmarkantnější rozdíl mezi postupnou variantou tří trysek a variantou pěti trysek. Zejména procesní plochy u varianty tří trysek jsou velmi malé. To je zapříčiněno výraznou tlakovou špičkou, která souvisí s dlouhou dráhou toku taveniny, než čelo dosáhne pozice pro otevření dalších trysek. Tlaková špička a následně použitý dotlak již při nízkých profilech a krátké době dotlaku způsobují předčasný výskyt vlasových zástříků a zástříků. Jak je také vidno, nezáleží v tomto případě ani na nastavené délce dotlaku ani na jeho velikosti.

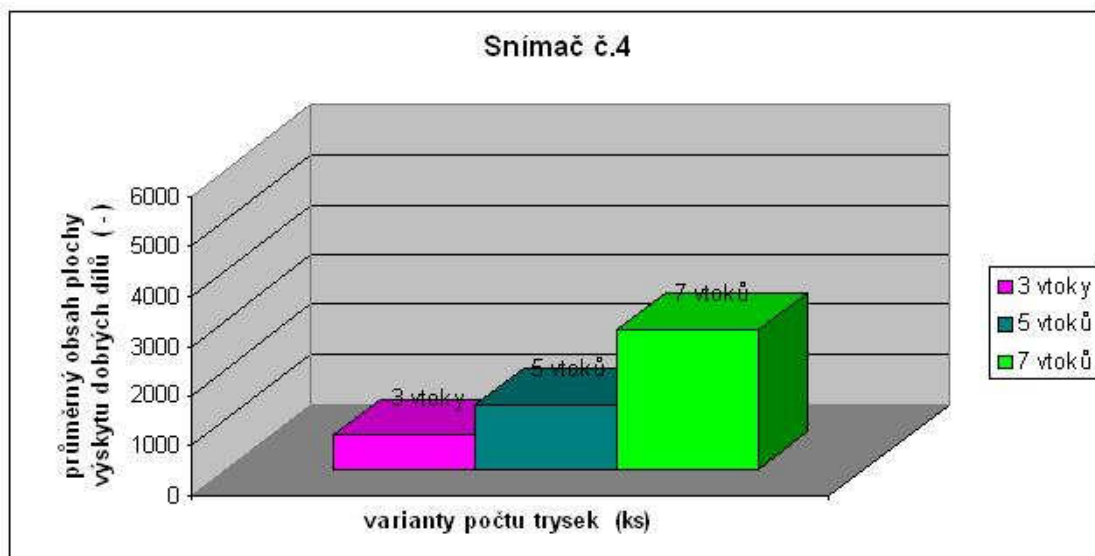
Z grafu pro snímač č.4 je patrné, že např. rozdíl mezi variantou tří trysek a pěti trysek není již tak propastný. Nutno ale podotknout, že oproti variantě pěti trysek jsou velikosti procesních ploch pro variantu tří trysek dosaženy v měřeném místě za použití vyšších dotlakových profilů. To je samozřejmě způsobeno absencí trysky, která by tuto oblast výrazněji ovlivňovala. Verze sedmi trysek v této oblasti dosahuje výrazně vyšších hodnot velikosti procesních ploch a to zejména díky rozsáhlejšímu působení tlaku, již při využití nízkých dotlakových profilů, vyvolaných vyšším počtem trysek ovlivňujících tuto oblast.

U snímače č.6, s přihlédnutím k dosaženým rozdílům v oblastech snímače č.1 a č.4, je možno konstatovat, že rozdíly v rámci členění dle počtu vstřikovacích trysek jsou menší. Nízké hodnoty procesních ploch byly dosaženy pouze u varianty tří trysek a sedmi trysek při použité době dotlaku 8s.

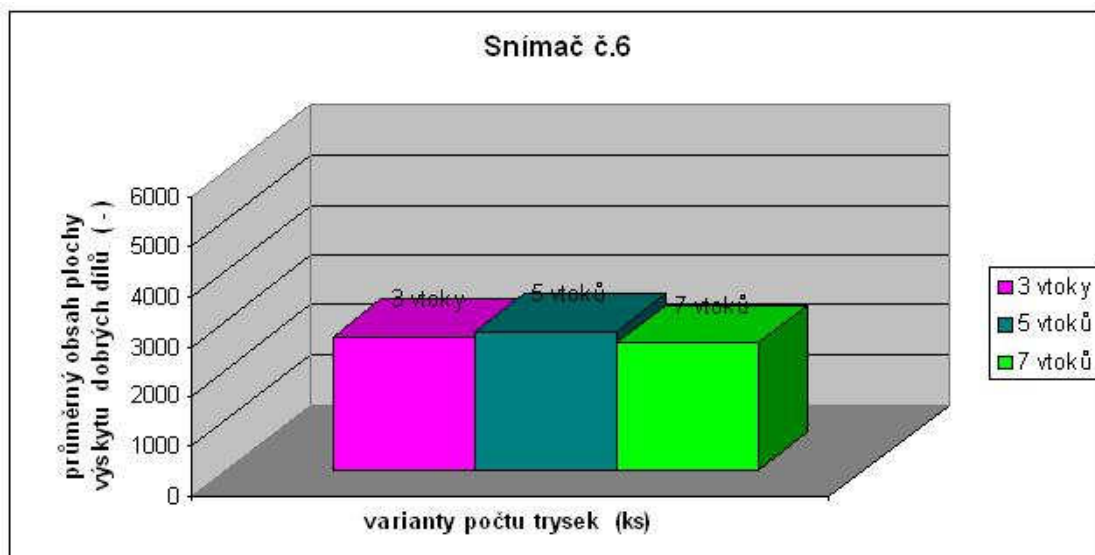
V následujících grafech č.79-81 jsou vyobrazeny průměrné velikosti procesních ploch pro jednotlivé oblasti snímačů v závislosti na počtu použitých uzavíratelných trysek.



Obr.79: Průměrné velikosti procesních ploch pro oblast snímače č.1 v závislosti na počtu trysek



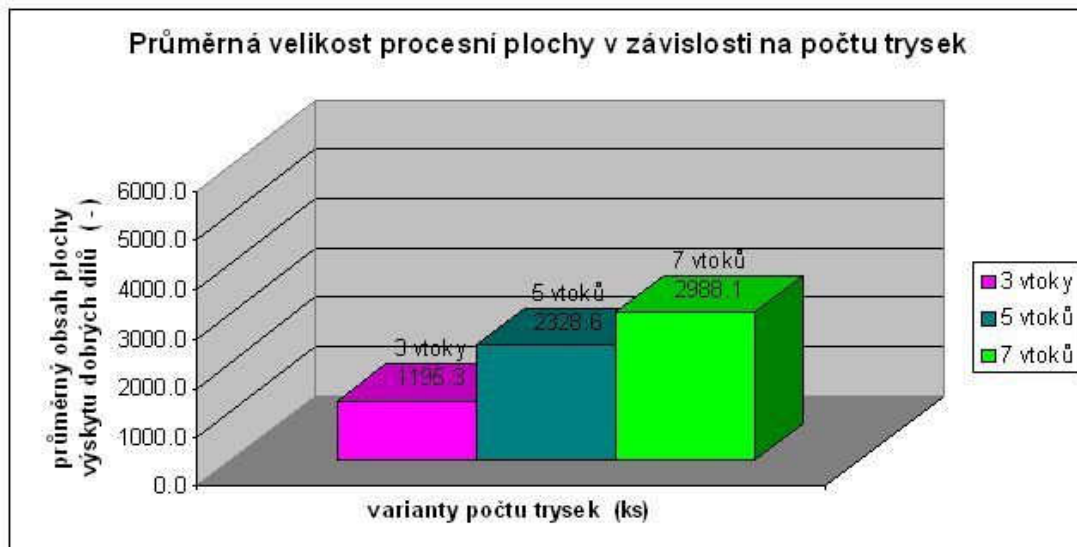
Obr.80: Průměrné velikosti procesních ploch pro oblast snímače č.4 v závislosti na počtu trysek



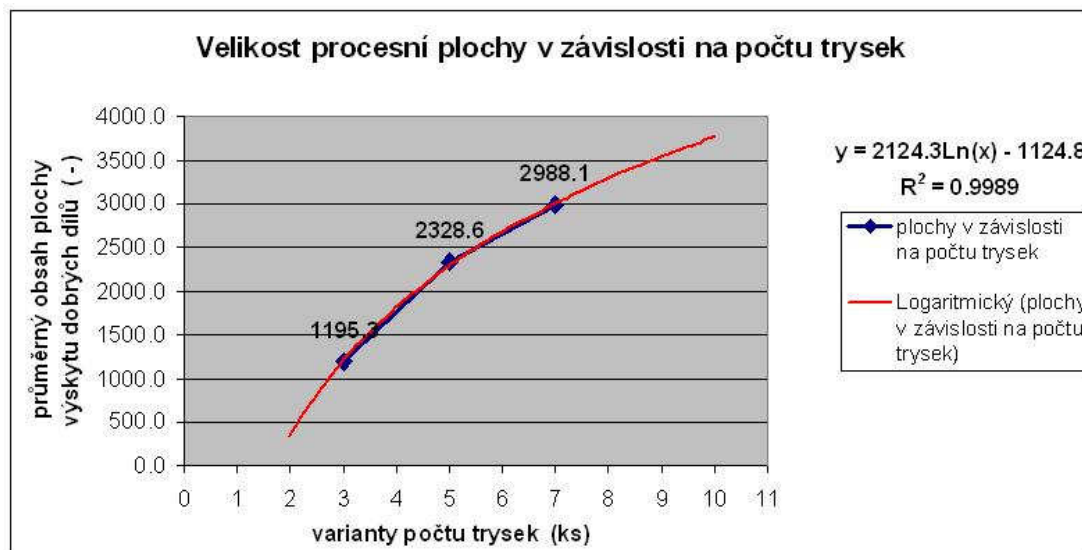
Obr.81: Průměrné velikosti procesních ploch pro oblast snímače č.6 v závislosti na počtu trysek

Pro vyhodnocení dílu, jako celku, byl vytvořen následující graf, poukazující na průměrnou velikost procesních ploch v závislosti na počtu trysek, nehledě na polohu snímače. Z tohoto grafu vyplývá, že nejméně vhodnou variantou vstřikování takového typu dílu je použití pouze tří uzavíratelných trysek. Pole, ve kterém se musí nastavení parametrů pohybovat, abychom docílili vyrobení dobrého dílu, je značně úzké. Téměř dvojnásobné velikosti procesní plochy docílíme, pokud použijeme ke vstřikování tohoto dílu systém, který obsahuje pět uzavíratelných

trysek. A při vstřikování dílu pomocí sedmi uzavíratelných trysek vzroste procesní plocha na 2,5 násobek plochy naměřené při použití tří trysek.

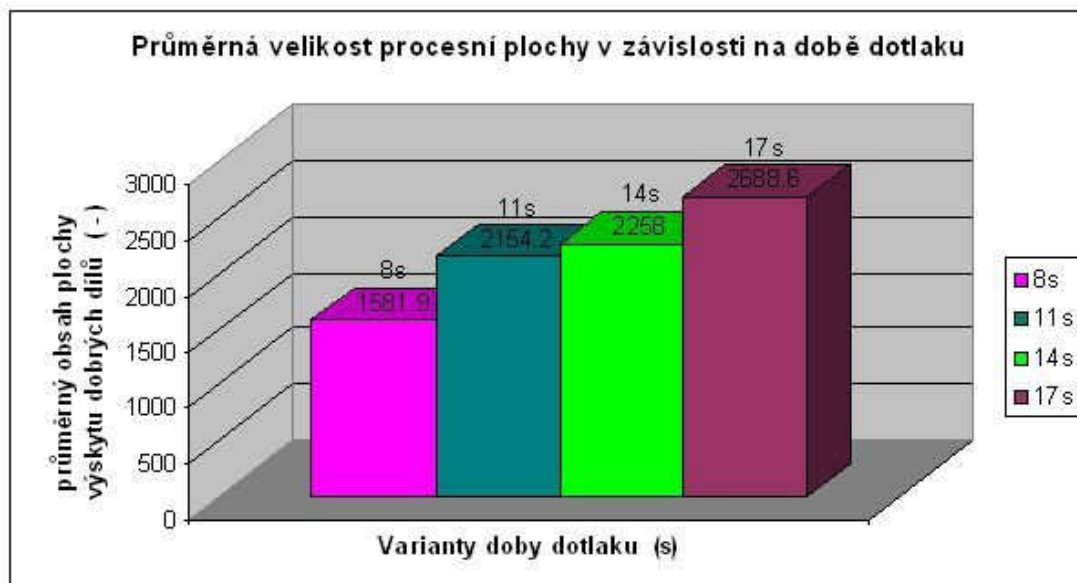


Obr.82: Průměrné velikosti procesních ploch pro celý díl v závislosti na počtu trysek

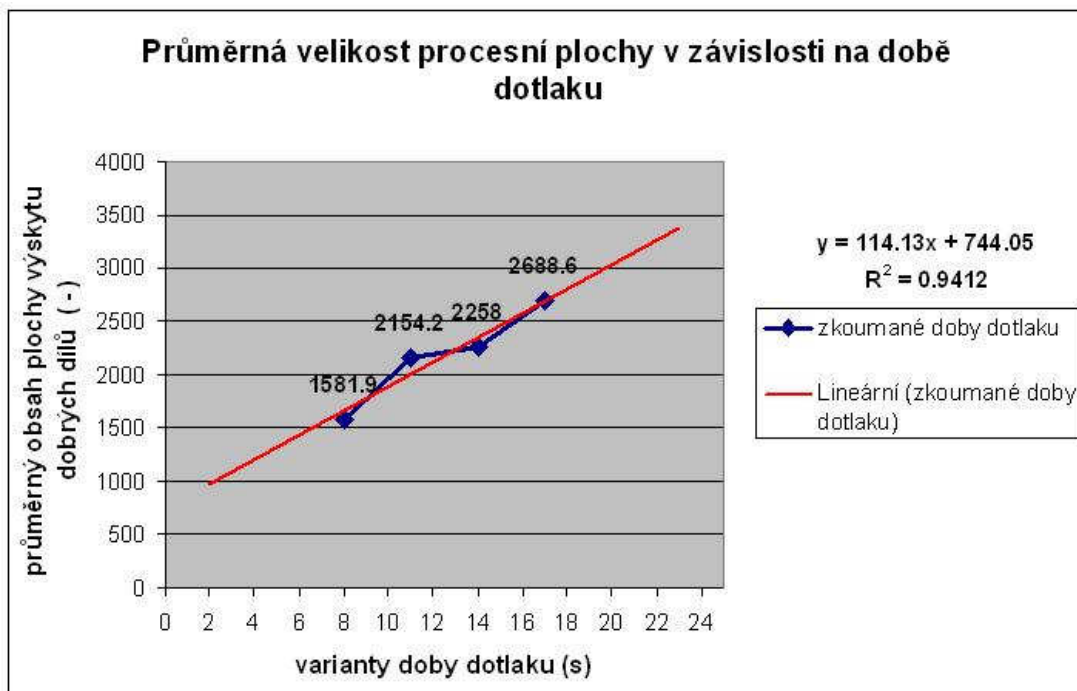


Obr.83: Regresní analýza průměrné velikosti procesních ploch pro celý díl v závislosti na počtu trysek

Dalším hodnoceným hlediskem bylo porovnání průměrných procesních ploch pro výrobu dobrého dílu v závislosti na použité době dotlaku. Cílem tohoto porovnání bylo stanovit ze zkoumaných variant optimální dobu dotlaku pro výrobu velkorozměrového dílu. Z procesního a kvalitativního hlediska se nejméně vhodnou jeví doba dotlaku 8s, která ve větší míře vyžaduje použití vyšších dotlakových profilů. Samozřejmě by ale nejvíce vyhovovala z hlediska ekonomického. Varianta s dobou dotlaku 14s dosáhla procesní plochy o cca 43% větší. Největší plochy bylo dosaženo u varianty doby dotlaku 17s. Tato byla o 70% větší než při variantě 8s.



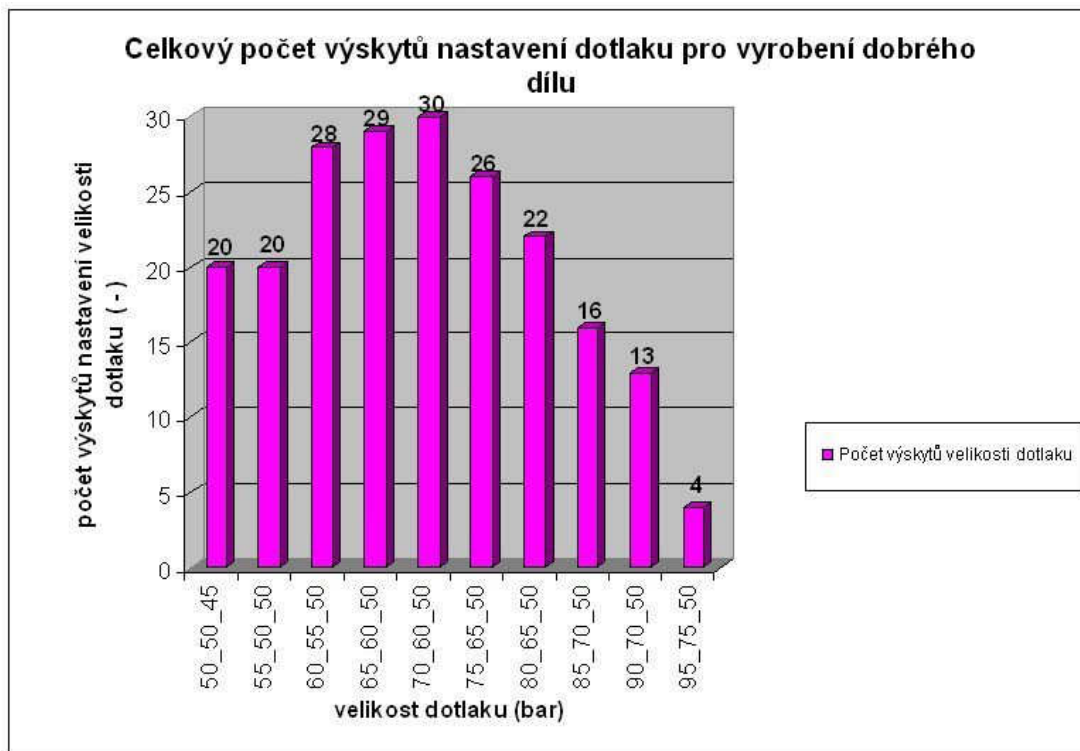
Obr.84: Průměrné velikosti procesních ploch pro celý díl v závislosti na době dotlaku



Obr.85: Regresní analýza průměrné velikosti procesních ploch pro celý díl v závislosti na době dotlaku

V neposlední řadě bylo hodnoceno také nastavení velikosti dotlaku viz obr. 86. Jako hodnotící kritérium byla zvolena četnost výskytu daných nastavení velikosti dotlaku uvnitř vybraného procesního pole. Cílem tohoto porovnání bylo stanovit ze zkoumaných variant optimální velikost dotlaku pro výrobu velkorozměrového dílu. Nejčetnější zastoupení ze všech zkoumaných dotlakových profilů má varianta

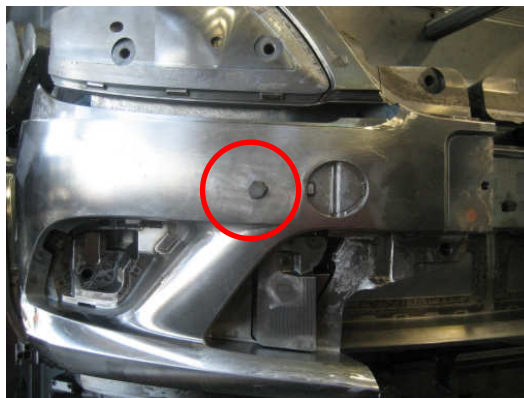
70 – 60 – 50 bar, což vztaženo procentuálně k použitému tlaku v momentě přepnutí na dotlak znamená 55% - 48% - 40%.



Obr.86: Zastoupení jednotlivých dotlakových profilů uvnitř vybraných procesních ploch

3.7.5. Vliv dotlaku a vliv počtu trysek na výslednou tloušťku stěny

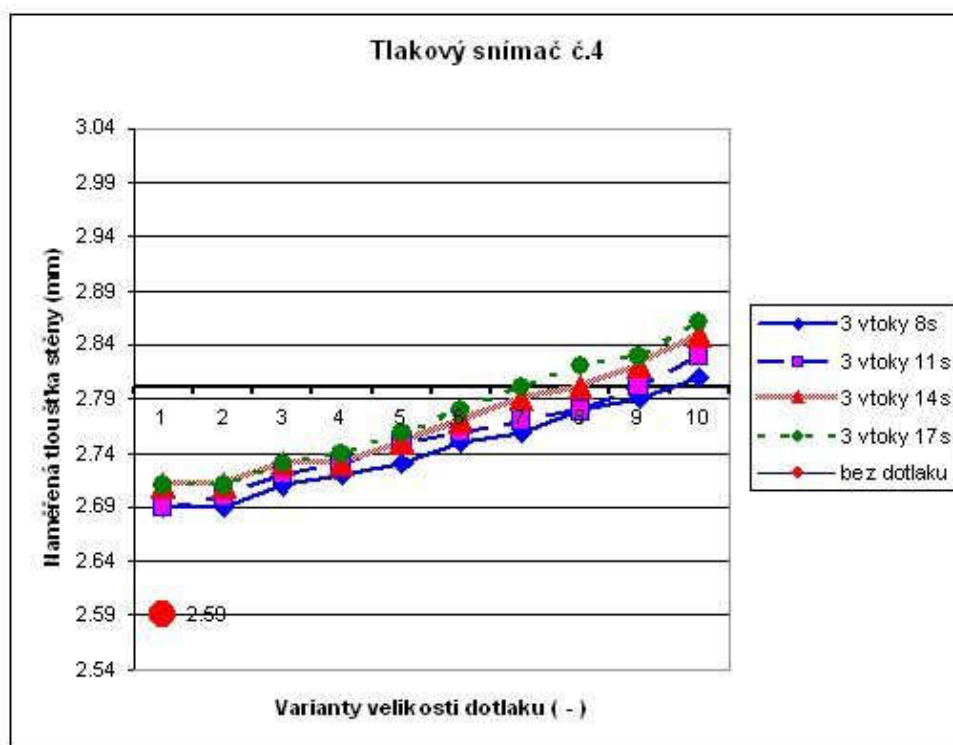
Vyrobené a označené díly, byly po kvalitativním vyhodnocení použity k dalším testům. Nejprve došlo k odběru vzorkových destiček u všech označených dílů z oblastí, ve kterých jsou umístěny tlakové snímače č.1, č.4 a č.6. Takto zajištěné vzorky sloužily v první fázi pro měření tloušťky stěny. Zároveň pro získání nominální hodnoty bylo nutné změřit skutečnou tloušťku stěny v těchto místech. Původně se tloušťka stěny měřila pomocí nástrojařské modelíny, která ale vykazovala, díky své tvarové nestálosti, výrazné odchylky při opakovaných měřeních. Z tohoto důvodu bylo přikročeno ke zjišťování skutečné tloušťky stěny v jednotlivých měřících místech pomocí olova, jak je zachyceno na následujícím obrázku. Olověný váleček se upevnil pomocí lepidla do měřeného místa na straně tvárníku. Následovalo uzavření nástroje a vytvoření standardní uzavírací síly. Po jeho otevření se u vzorků měřil rozměr po deformaci reprezentující skutečnou tloušťku stěny v měřeném místě.



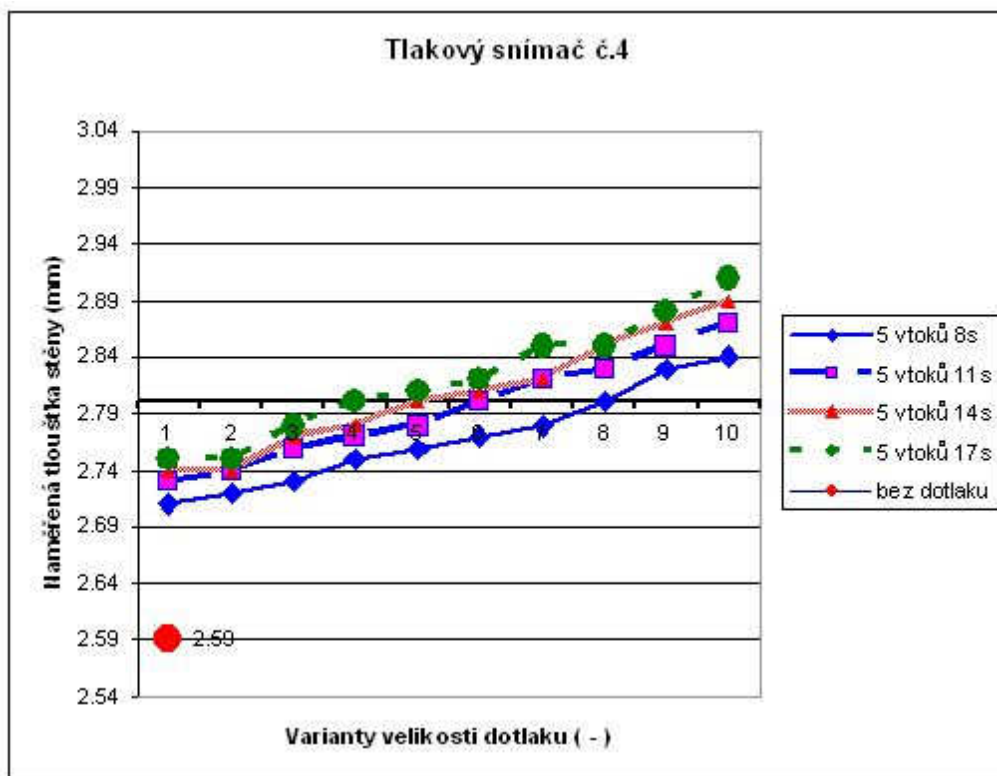
Obr.87: Měření skutečné tloušťky stěny pomocí olova

Tento způsob měření nebyl destruktivním. Pouze díky tření olova o ocelovou tvárnici během plastické deformace došlo k viditelnému avšak velmi drobnému poškrábání leštěného povrchu tvárnice strany, které bylo velice snadno odstraněno. Takto bylo zjištěno, že tloušťka stěny v měřicím místě snímače č.1 je 2,72 mm. U měřicího místa č.4 byla naměřena hodnota 2,8 mm a v místě snímače č.6 hodnota 2,9 mm.

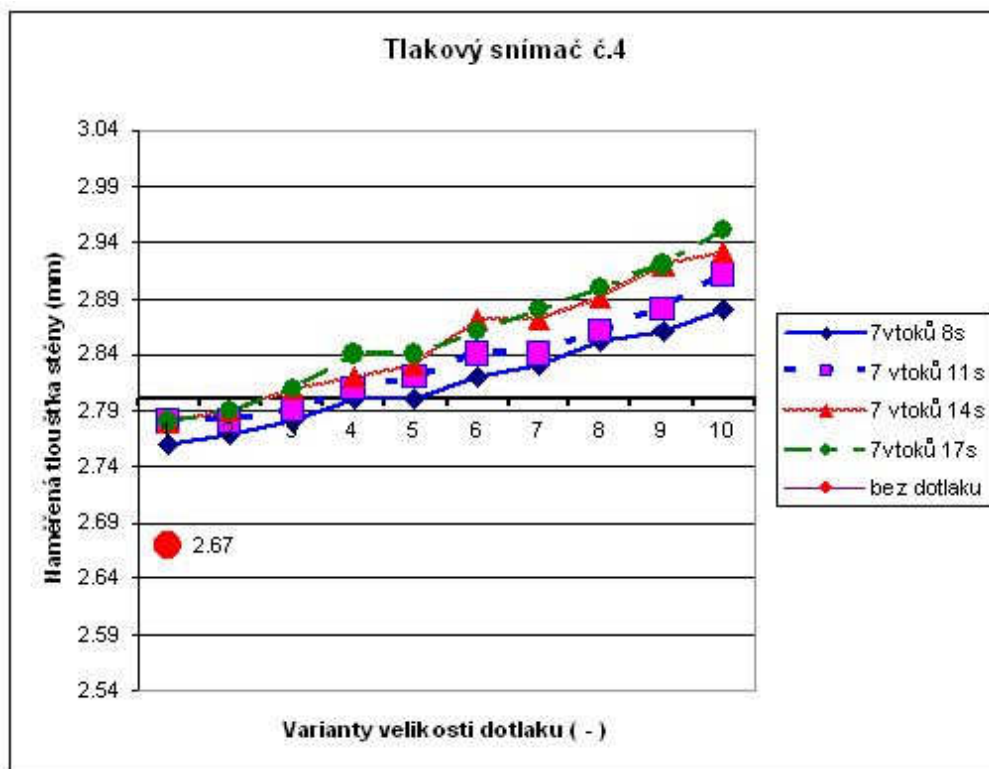
Následují grafy pro naměřené tloušťky stěny v závislosti na použitém dotlaku, počtu trysek a měřicím místě. Uvedené grafy jsou pouze pro variantu snímače č.4, protože je zde dobře patrný vliv počtu trysek na naměřené tloušťky stěny. Ostatní grafy jsou v příloze disertační práce.



Obr.88: Naměřené tloušťky stěny při použití tří trysek v oblasti snímače č.4



Obr.89: Naměřené tloušťky stěny při použití pěti trysek v oblasti snímače č.4



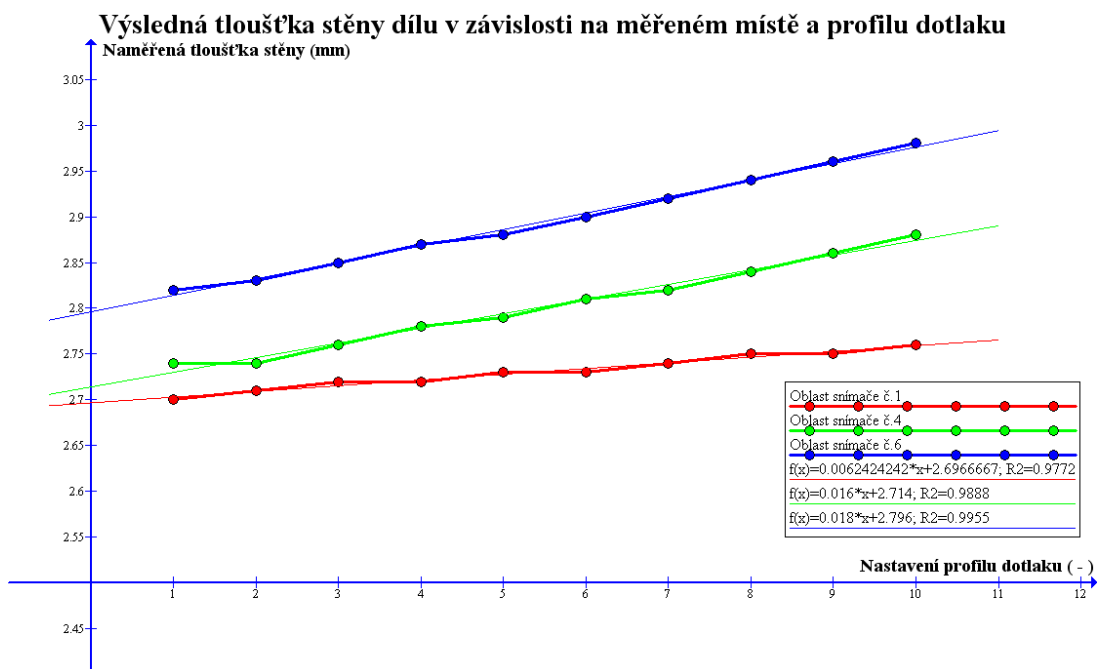
Obr.90: Naměřené tloušťky stěny při použití sedmi trysek v oblasti snímače č.4

Jak je z grafu na obr. č.88 patrné, při použití tří trysek se naměřené pole pohybuje z velké části pod nominální hodnotou tloušťky stěny. To je pravděpodobně způsobeno tím, že na tuto oblast nepůsobí přímo tryska, která by oblast ovlivňovala zejména v dotlakové fázi. Tryska č.4 a hlavně prostřední tryska č.7 jsou již příliš vzdálené. Díky narůstajícím tlakovým ztrátám se zvětšující se vzdáleností od pozic trysek je působení dotlakové fáze v oblasti snímače č.4 nedostatečné a tedy potlačování objemového smrštění plastu v této oblasti nevýrazné. Naproti tomu u varianty sedmi trysek, jak je vidno z obr.90, se pole naměřených hodnot pohybuje z větší části nad nominální hodnotou tloušťky stěny. Jelikož tuto oblast ovlivňuje více trysek najednou, konkrétně tryska č.4, č.5 i č.6, dostává se tloušťka stěny v této oblasti již při nižších nastaveních dotlaku do expanze. Jak je také patrné, nezáleží tolik na době dotlaku, ale významnějším faktorem je velikost dotlaku. Doba dotlaku způsobuje pouze dřívější či pozdější překročení nominální hodnoty tloušťky stěny.

Nutno také podotknout, že pro oblast snímače č.4 i snímače č.6 by naměřené výsledky mohly být z části ovlivněny také chybou nástroje. Jedná se o možný pohyb tvarových částí tvárníkové strany nástroje, kdy vlivem působení tlaku taveniny by mohlo dojít k jejich pohybu směrem do tvárníku nebo k jejich ohybu. Toto by mohlo nastat, pokud by tvarové části nebyly řádně usazeny a slícovány v pevné části tvárníku nebo možnou vůlí v kotvení tvarové části. Díky těmto skutečnostem byly díly vizuálně kontrolovány, zda nedochází ke zhoršení slícovaného dělení, což by nasvědčovalo některému z výše popsaných nežádoucích pohybů tvarových částí. Během vizuální kontroly nebylo zhoršení stavu zaznamenáno, nicméně pohyby v řádu setin milimetru by vizuální kontrola neodhalila.

Na dalším obrázku č.91 je graf průměrných tlouštěk stěn dílu v závislosti na měřicím místě a na velikosti profilu dotlaku. Průměrné hodnoty byly zhotoveny ze zkoumaných dob dotlaku a také z variant počtu trysek. Jednotlivé profily dotlaku a měřené místo dávají směrnici výsledné přímce. Na ose x jsou tedy vyneseny již dříve popsané varianty dotlakových profilů, na ose y je to změřená výsledná tloušťka dílu. Každá z přímek označuje jedno z měřicích míst. Provedená lineární regrese ukazuje, že nejmenší směrnici má přímka z místa snímače č.1. Směrnice přímky z měřicího místa č.4 je cca 2,6-krát vyšší. A výsledná směrnice z oblasti snímače č.6 je 3-krát vyšší než z místa snímače č.1. Z provedené analýzy vyplývá, že na strmost výsledné přímky má největší vliv místo měření. Není to však samotné místo měření, ale čas působení tlaku taveniny na dané místo a konkrétněji je to čas vstřiku, který stojí za ovlivněním strmosti přímky. Čím déle je takové místo vystaveno působení tlaku taveniny ještě před samotným přepnutím na dotlakovou

fázi, tím užší je nezatuhlé jádro taveniny a tím menší je z hlediska dotlaku jeho výsledné působení na tuto oblast. Z tohoto pak vyplývá i menší směrnice přímky při působení dotlakových profilů. Proto by bylo výhodné zkrátit čas vstřiku na co nejmenší hodnotu, aby byly výsledné rozdíly směrnic co možná nejmenší a zároveň tyto poznatky zohlednit při stavbě vstřikovacího nástroje tak, aby veškeré dělicí roviny i lícování a odvzdušnění nástroje odpovídali požadavku na co nejkratší čas vstřiku bez kvalitativních rizik.



Obr.91: Lineární regrese průměrných tloušťek stěn dílu v závislosti na měřeném místě a velikosti dotlaku

3.7.6. Hodnocení pevnosti ve stříhu

Na základě měření dosažených tloušťek stěn byly vybrané vzorky posléze podrobeny zkoušce pevnosti ve stříhu. Zkouška pevnosti ve stříhu je považována za přesnější než zkouška pevnosti v tahu a navíc není nutné zohledňovat izotropii vlastností tělesa.

Místo odběru vzorků pro zkoušku se shodovalo s měřícím místem tlakového snímače a tedy i s místem měření tloušťky stěny. Pro hodnocení pevnosti ve stříhu bylo vybráno umístění tlakového snímače č.1, který je umístěn na začátku tokové dráhy taveniny, a tlakového snímače č.6, který se nachází na konci tokové dráhy taveniny. Jednotlivé varianty zohledňovaly jak počet uzavíratelných trysek, tak délku i velikost dotlaku. U každé z variant bylo měření opakováno 4-krát a jejich průměr

byl označen jako výsledná hodnota daného nastavení. Tabulka obsahující naměřené hodnoty je uvedena v příloze.

Zkouška probíhala na zkušebním trhacím zařízení značky TIRATEST 2300 vybaveném softwarem Labtest 2, viz obr. 92. Do tohoto zařízení byl upnut zkušební střížný nástroj s pákovým mechanismem pro přidržení testovaných vzorků viz obr. 93. Byl zvolen střížník o průměru 22,15mm se střížnou mezerou 0,025mm. Rychlost pohybu střížníku byla nastavena na konstantní hodnotu $v_{st} = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



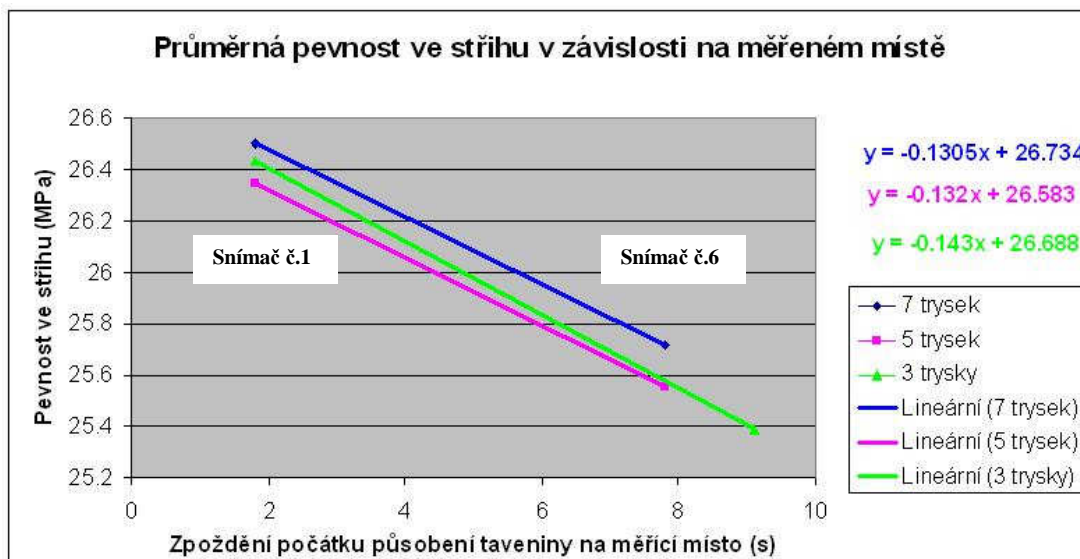
Obr.92: Zkušební zařízení Tiratest 2300



Obr.93: Střížný nástroj

Z analýzy pevnosti ve stříhu vyplývá, že díly vyrobené pomocí sedmi uzavíratelných trysek vykazují nejvyšší hodnoty pevnosti ve stříhu v porovnání s variantou pěti trysek resp. tří trysek. Dále je možno konstatovat, že nejen s narůstající dráhou toku, ale také se vzrůstající časovou prodlevou od počátku působení taveniny na dané místo, klesají hodnoty pevnosti ve stříhu v měřeném místě. Nejvyšší naměřená hodnota pevnosti ve stříhu $\tau_s = 26,5 \text{ MPa}$ byla v okolí snímače č.1. Naproti tomu v okolí snímače č.6 byla naměřena nejnižší hodnota pevnosti ve stříhu 25,4 MPa. Maximální naměřený rozdíl mezi místem snímače č.1 a č.6 byl zaznamenán u varianty tří trysek a to 1,04 MPa. Po provedení lineární regrese hodnot pevnosti ve stříhu v závislosti na zpoždění počátku působení tlaku

taveniny na měřicí místo byla zjištěna u varianty sedmi trysek směrnice -0,1305. Pro variantu pěti trysek má směrnice hodnotu -0,132 a pro variantu tří uzavíratelných trysek je hodnota směrnice -0,143. Hodnota směrnice tedy závisí nejen na naměřených hodnotách pevnosti ve střihu, ale také na zpoždění počátku působení taveniny na měřicí místo.



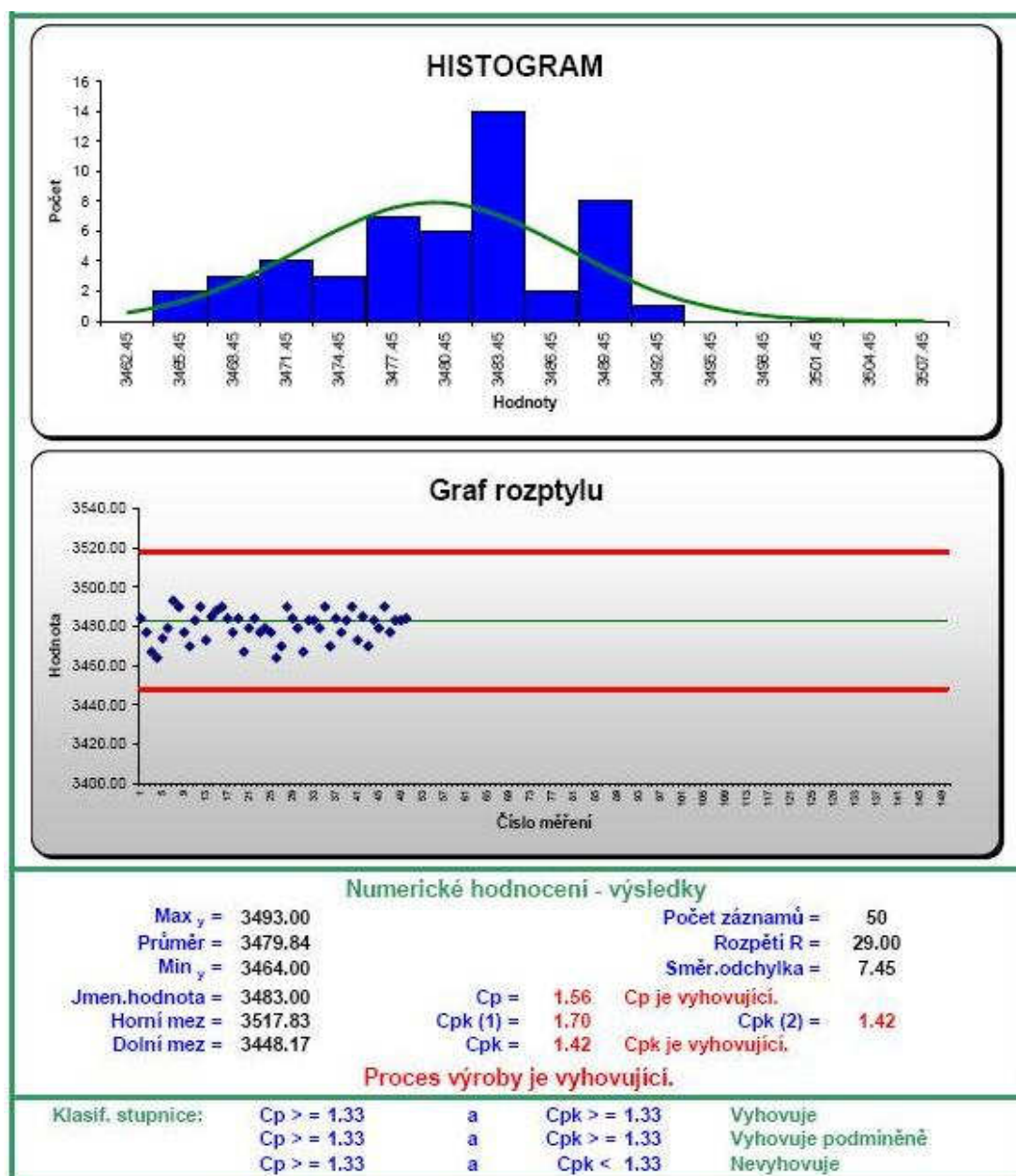
Obr.94: Lineární regrese průměrných pevností ve střihu v závislosti na zpoždění počátku působení taveniny na měřicí místo

3.7.7. Analýza způsobilosti vstřikovacího procesu krátkodobou zkouškou pro varianty přepínání na dotlak

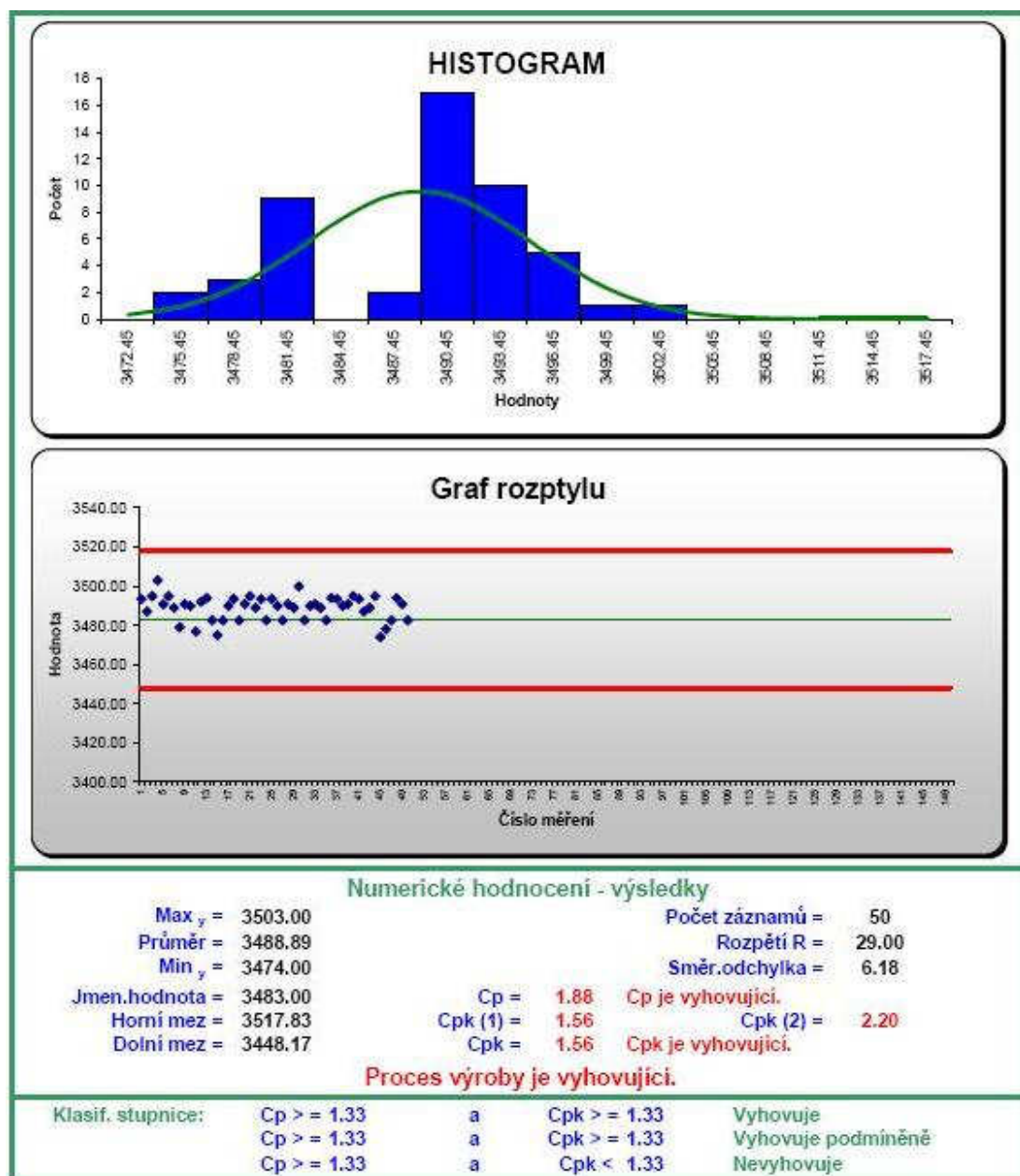
Jak již bylo v kapitole 2.7.3. popsáno, bývá v odborné literatuře způsob přepínání na dotlak pomocí vnitřního tlaku v dutině nástroje označován jako nej přesnější, ale také technicky nejnáročnější. Jelikož tyto experimenty jsou realizovány na laboratorních nástrojích malých rozměrů nebo se již v praxi tento způsob uplatňuje na sériových nástrojích malých rozměrů, je jedním z cílů této disertační práce prověřit platnost tohoto tvrzení i při použití sériového velkorozměrového nástroje vybaveného vtokovým systémem obsahujícím uzavíratelné trysky pro kaskádové vstřikování.

Popis experimentu je uveden v kapitole 3.6., přičemž analyzovaným parametrem pro hodnocení způsobilosti procesu krátkodobou zkouškou byla zvolena hmotnost vyráběných dílů. Pro obě varianty způsobu přepínání na dotlakovou fázi byly indexy způsobilosti procesu stanoveny na základě výrobní série 50 ks. Základním kritériem je dosažení doporučené minimální způsobilosti procesu

pro dvoustrannou specifikaci $C_p, C_{pk} \geq 1,33$. V takovém případě je možné prohlásit výrobní proces za způsobilý.



Obr.95: Krátkodobá zkouška způsobilosti procesu při přepnutí na dotlak od vstřikovacího stroje



Obr.96: Krátkodobá zkouška způsobilosti procesu při přepnutí na dotlak pomocí vnitřního tlaku v dutině nástroje

Jak je z obr. 95 patrné, výrobní proces při přepnutí na dotlak od vstřikovacího stroje je možno považovat za způsobilý, jelikož byla splněna podmínka $C_p, C_{pk} \geq 1,33$. Z obr. 96 vyplývá, že je způsobilý i výrobní proces při přepnutí na dotlak pomocí vnitřního tlaku v dutině nástroje.

Při přepínání na dotlak pomocí vnitřního tlaku v dutině nástroje byly dosaženy vyšší hodnoty $C_p = 1,88$ i $C_{pk} = 1,56$ v porovnání s přepínáním na dotlak od vstřikovacího stroje s výslednou hodnotou $C_p = 1,56$ a $C_{pk} = 1,42$. Zároveň bylo dosaženo menší směrodatné odchylky při přepínání na dotlak pomocí vnitřního tlaku

v dutině nástroje. Při porovnání výše uvedených způsobů přepínání na dotlakovou fázi je možné i pro kaskádové vstřikování velkorozměrových dílů potvrdit, že přepínání na dotlak pomocí vnitřního tlaku v dutině nástroje je přesnější a povede za určitých podmínek k vyšší stabilitě výroby.

3.7.8. Tlakové řízení vstřikovacího procesu pomocí jednotky CoMo

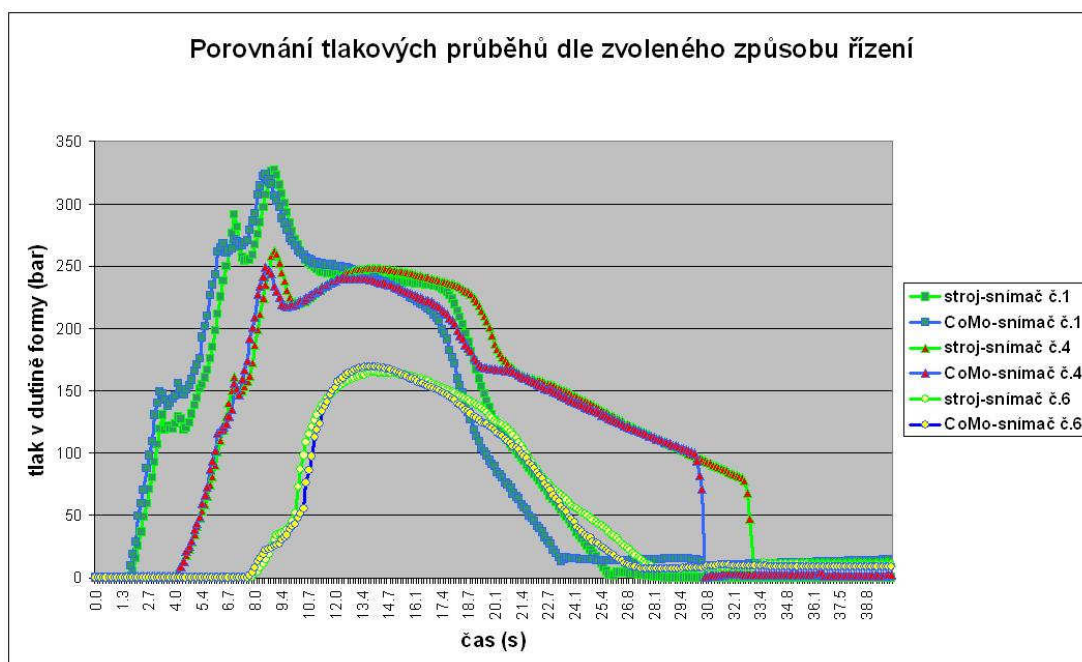
Nastavení parametrů pro řízení uzavíratelných trysek vtokového systému pomocí jednotky CoMo bylo již popsáno v kapitole 3.6.1. Po provedené monitorizaci a aktivaci funkce Threshold pro jednotlivé tlakové snímače započalo vstřikování dílů s řízením uzavíratelných trysek pomocí jednotky CoMo. Uzavíratelná tryska č.7 byla jako jediná řízena od pozice šneku. Tato tryska je počátečním místem, odkud proudí tavenina do dutiny nástroje. Navíc v okamžiku povolení vstřiku je tlak v dutině nástroje roven 0 a není tedy možno nastavit hodnotu nenulového tlaku do funkce threshold pro signál trysku otevřít. S postupujícím čelem taveniny od trysky č.7 byly následně otevřeny trysky č.6 a č.8 na základě informace o dosažení požadovaného tlaku u snímače č.1 (CH1). Při dalším postupu čela taveniny byla dle signálu snímače č.2 (CH2) o dosažení požadované hodnoty vnitřního tlaku otevřena uzavíratelná tryska č.5. Analogicky byla otevřena tryska č.9 na základě signálu ze snímače č.3 (CH3). Pomocí signálu z tlakového snímače č.4 (CH4) a snímače č.5 (CH5) byly otevřeny v daný okamžik trysky č.4 a č.10.

Dále bylo využito snímače č.6 pro přepnutí na dotlakovou fázi. Tímto krokem končilo řízení vstřikovacího procesu pomocí vnitřního tlaku v dutině nástroje prostřednictvím jednotky CoMo, jelikož dotlaková fáze již byla řízena pomocí vstřikovacího stroje. Následuje porovnání tlakových průběhů ve vybraných místech pro standardní i tlakové řízení vstřikovacího procesu. Zelené křivky jsou již dříve naměřené průběhy tlaku v dutině nástroje pro zvolené tlakové snímače č.1, č.4 a č.6. Z hlediska zkoumaných profilů dotlaku a doby dotlaku byla pro tuto část experimentu zvolena varianta č.42. U této je doba dotlaku nastavena na 11s a dotlakový profil obsahuje hodnoty 70bar, 60bar a 50bar v časových úsecích 3s, 4s a 4s. Stejné nastavení dotlaku bylo použito i při tlakovém řízení vstřikovacího procesu pomocí jednotky CoMo a tyto výsledné průběhy jsou vyznačeny modrou barvou. Jak je z obrázku patrné, nevykazují mezi sebou porovnávané průběhy zásadní rozdíly. Průběhy pro oblast tlakového snímače č.1 se lehce odlišují v oblasti otevření trysek č.6 a č.5, kde dosáhlo řízení pomocí jednotky CoMo vyššího tlaku o cca 20bar oproti standardnímu řízení. Další rozdíl je v oblasti trysky č.4, kde můžeme pozorovat dvě

nižší tlakové špičky při řízení jednotkou CoMo oproti jedné špičce u standardního řízení. To je způsobeno nepatrnou časovou prodlevou v dosažení požadované hodnoty vnitřního tlaku pro trysku č.4 a k ní symetrické trysce č.10. Každá z těchto trysek byla řízena pomocí jednotky CoMo samostatně oproti standardnímu řízení, kde byla pro obě trysky zadána jedna hodnota polohy šneku pro otevření trysky. V dotlakové fázi spočívá rozdíl v rychlejším poklesu tlaku v dutině nástroje při řízení pomocí jednotky CoMo, což může být způsobeno drobným rozdílem v momentu přepnutí na dotlak.

Průběhy pro oblast snímače č.4 se v oblasti vstřiku odlišují prakticky až v momentě přepnutí na dotlak, kdy špičkový naměřený rozdíl činí 12bar. O tuto hodnotu bylo dříve přepnuto na dotlak pomocí jednotky CoMo a tomu také může odpovídat průběh tlakových profilů v dotlakové fázi, kdy řízení pomocí CoMo nedosáhlo totožných hodnot tlaku naměřených při standardním způsobu řízení.

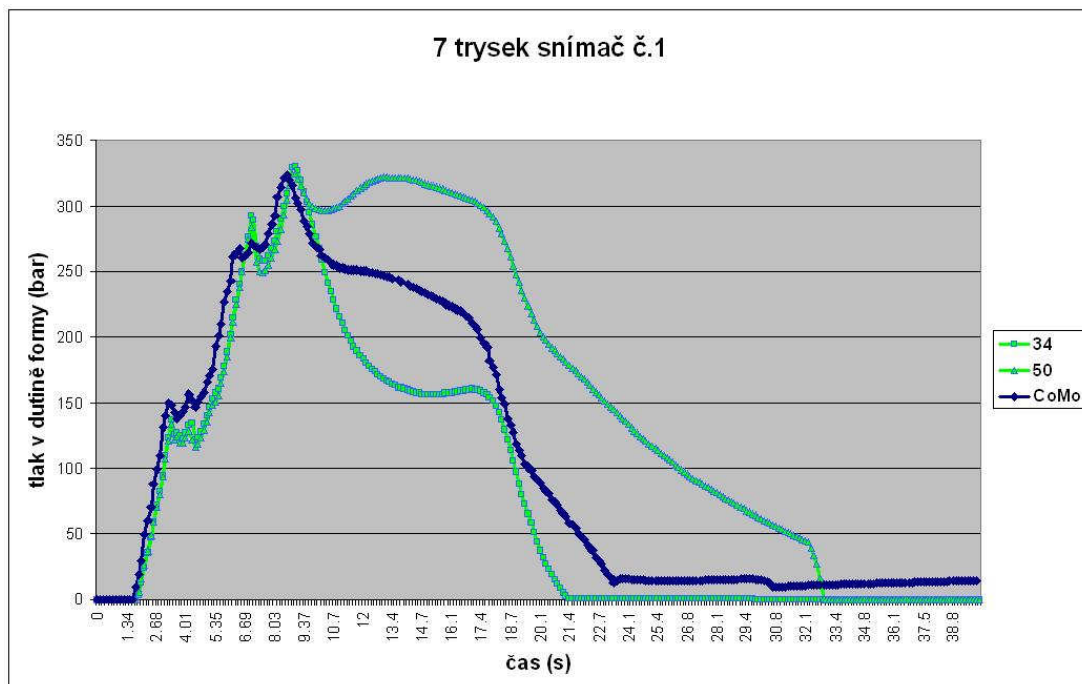
V oblasti snímače č.6 se naměřené průběhy prakticky neliší, pouze je patrný drobný rozdíl v dotlakové fázi, kdy průběh naměřený pomocí jednotky CoMo klesá rychleji.



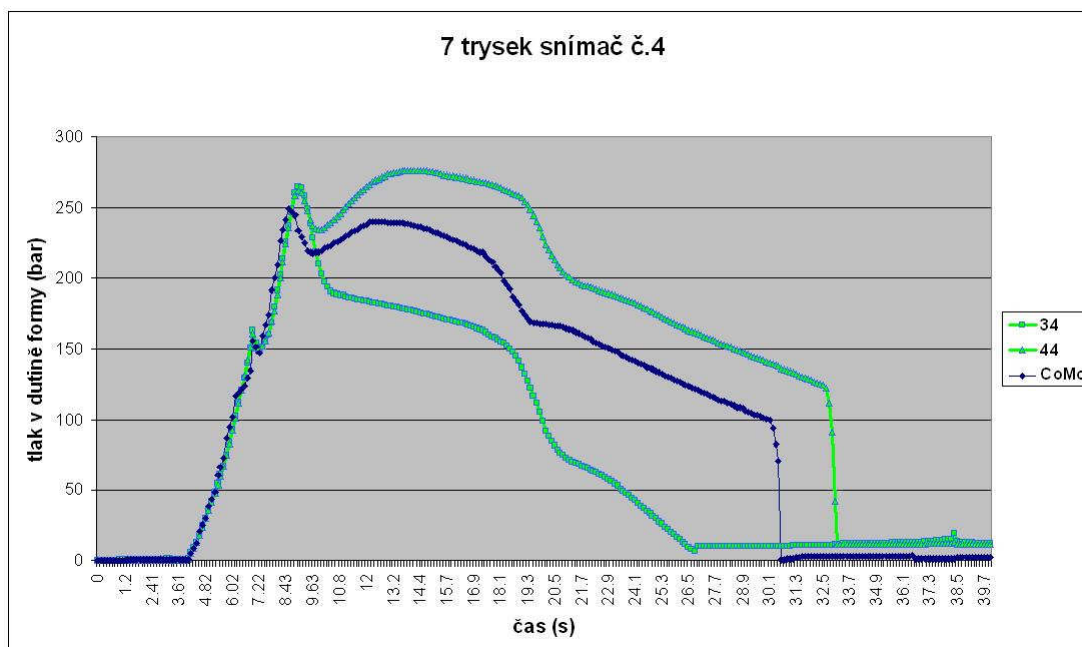
Obr.97: Porovnání tlakových průběhů pro rozdílné způsoby řízení

Díly vyrobené pomocí tlakového řízení jednotkou CoMo byly následně kvalitativně vyhodnoceny dle kritérií popsanych v kapitole 3.7.3. Z hodnocení vyplynulo, že díly jsou označeny jako vyhovující. Na základě tohoto tvrzení bylo přikročeno k porovnání zkoumaných tlakových průběhů s již definovanou oblastí

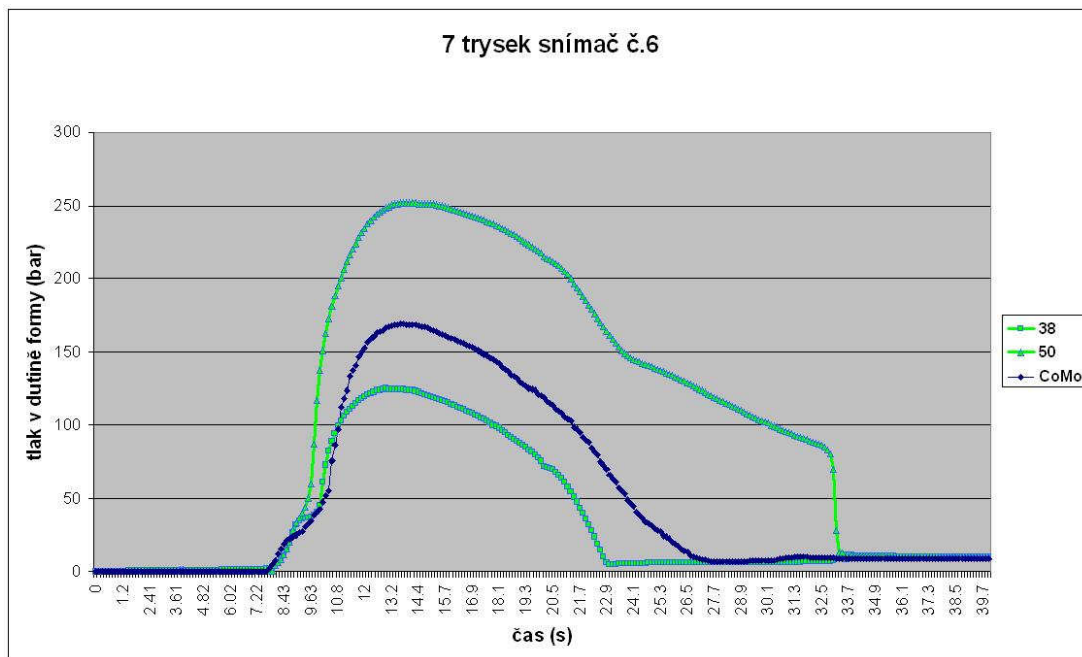
výskytu dobrých dílů pro každé z měřicích míst. Následují obrázky průběhů vymezujících oblast vad v porovnání s vloženou zkoumanou tlakovou křivkou.



Obr.98: Křivka tlakového řízení v oblasti výskytu dobrých dílů (oblast snímače č.1)



Obr.99: Křivka tlakového řízení v oblasti výskytu dobrých dílů (oblast snímače č.4)



Obr.100: Křivka tlakového řízení v oblasti výskytu dobrých dílů (oblast snímače č.6)

Z výše uvedených obrázků lze vyvodit, že vyhodnocená kvalita zkoumaných dílů je odpovídající dílům vyrobeným standardním řízením. Potvrzuje to také porovnání s oblastmi, které vymezují výskyt dobrých dílů. Pro všechna měřicí místa byla zkoumaná křivka uvnitř oblasti s výskytem dobrých dílů. Je tedy možné konstatovat, že díly vyrobené tlakovým řízením pomocí jednotky CoMo jsou kvalitativně srovnatelné s díly, které jsou vyrobeny standardním způsobem. Dokládá to i další vizuální test, kdy byly inkriminované díly nalakovány sériovým způsobem a poté opět kvalitativně vyhodnoceny jako díly bez sledovaných vad.

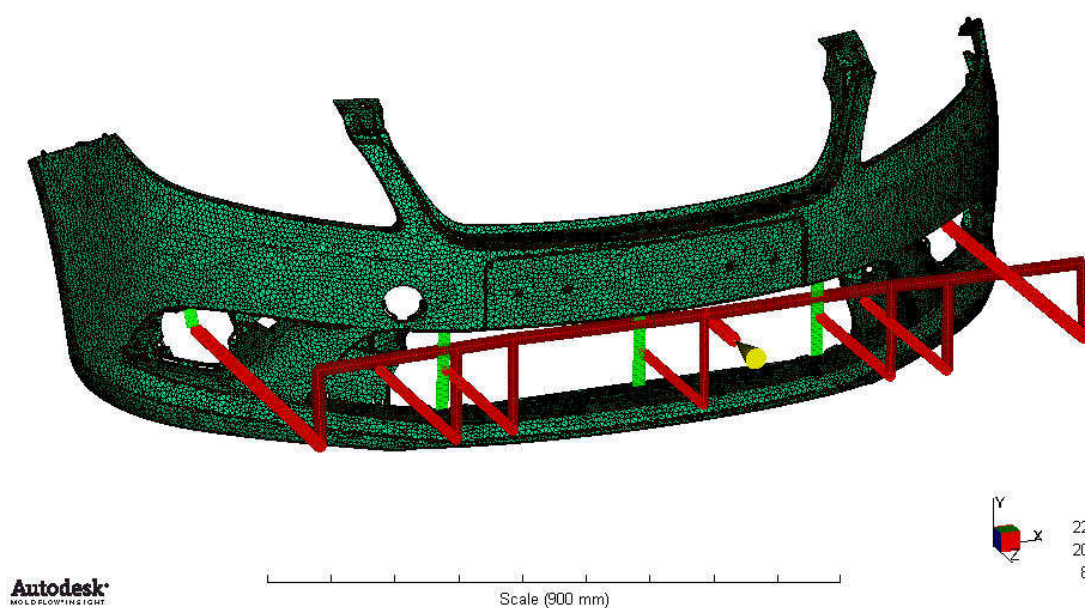
Bohužel nutno na druhou stranu podotknout, že řízení procesu vstřikování pomocí jednotky CoMo je mnohem složitější a pracnější než je tomu u standardního řízení vstřikovacím strojem.

3.8. Softwarové simulace vstřikování velkorozměrového dílu

Pro simulace vstřikování velkorozměrového dílu, jakým je i vybraný nárazník, byl využit software Moldflow Plastics Insight 2010 dodávaný firmou Autodesk. Pomocí něj je možné detailně analyzovat celý vstřikovací proces se základním členěním na fázi vstřiku, dotlaku, chlazení a modulem pro výpočet deformací.

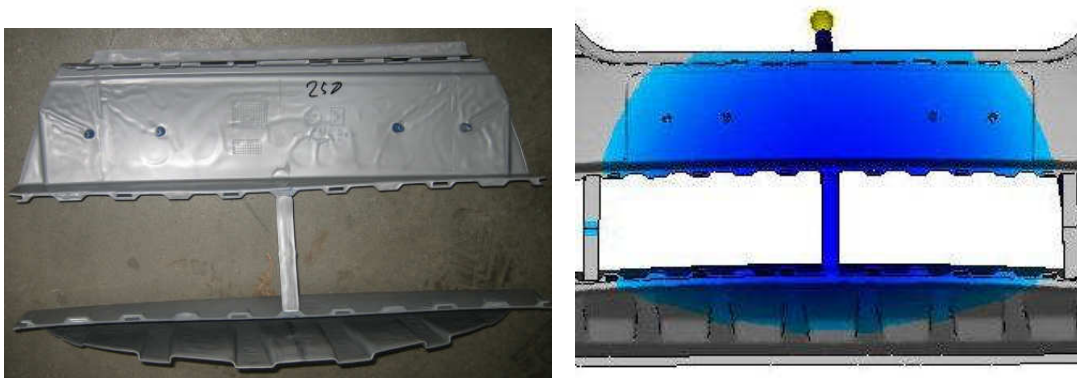
Model pro simulace nebyl připraven pomocí jednodušší střednicové sítě, ale byla použita složitější povrchová síť (Dual domain), skládající se z trojúhelníkových elementů. Celkový počet elementů dosáhl hodnoty 158 368. Dále byl vytvořen

model vyhřívaného vtokového systému obsahující uzavíratelné trysky. Chladicí okruhy nebyly díky výpočtové a s tím spojené časové náročnosti konstruovány. Tím pádem se při simulaci automaticky předpokládá rovnoměrný odvod tepla z dutiny nástroje. Z hlediska tlakových procesů nemají teplotní niance stěny nástroje způsobené konstrukcí chladicích okruhů v porovnání se zadanou uniformní hodnotou teploty stěny významný vliv. Zadána tedy byla pro automatický výpočet pouze hodnota teploty stěny nástroje.

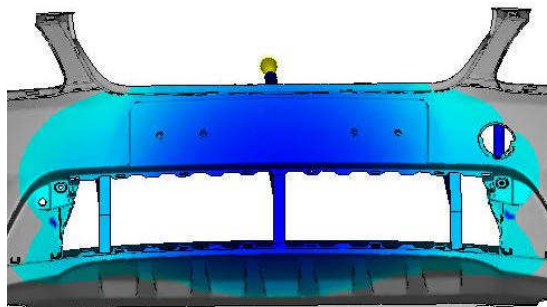


Obr.101: Model nárazníku včetně vtokové soustavy pro softwarovou simulaci

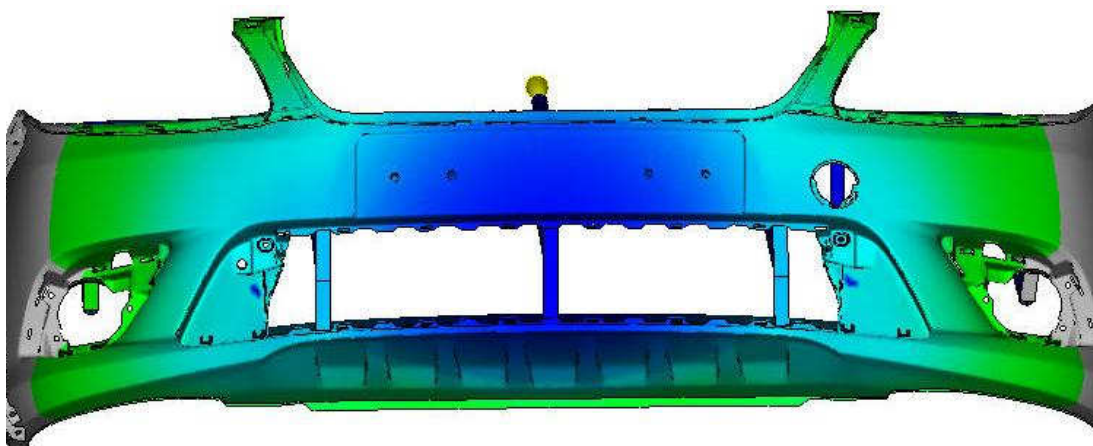
Na následujících obrázcích je znázorněno porovnání plnění dutiny nástroje v reálných podmínkách a pomocí simulace.



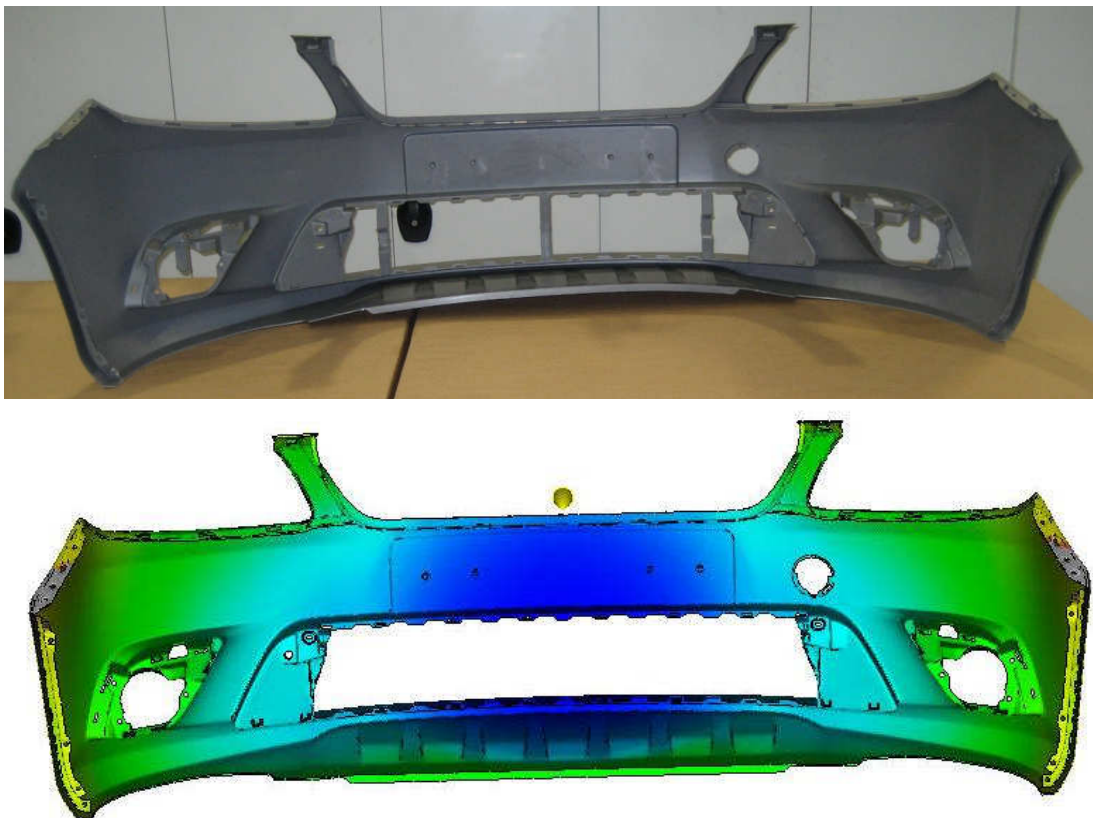
Obr.102: Porovnání plnění dutiny nástroje v reálných a simulovaných podmínkách v okamžiku před otevřením trysek č.6 a č.8



Obr.103: Porovnání plnění dutiny nástroje v reálných a simulovaných podmínkách
v okamžiku před otevřením trysek č.5 a č.9



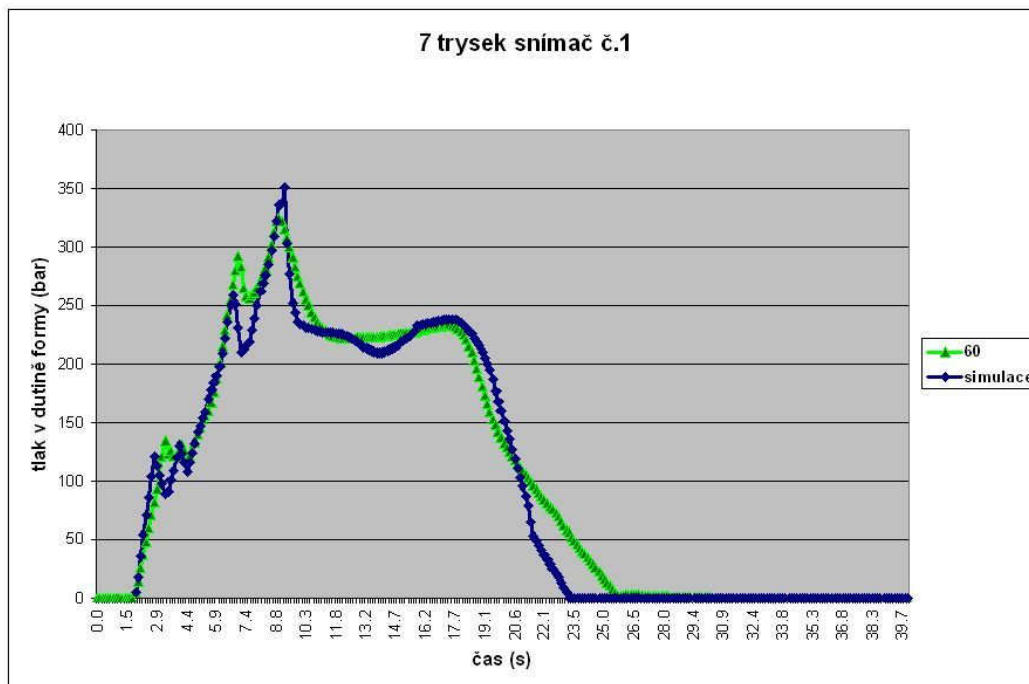
Obr.104: Porovnání plnění dutiny nástroje v reálných a simulovaných podmínkách
v okamžiku otevření trysek č.4 a č.10



Obr.105: Porovnání plnění dutiny nástroje v reálných a simulovaných podmínkách v okamžiku přepnutí na dotlakovou fázi

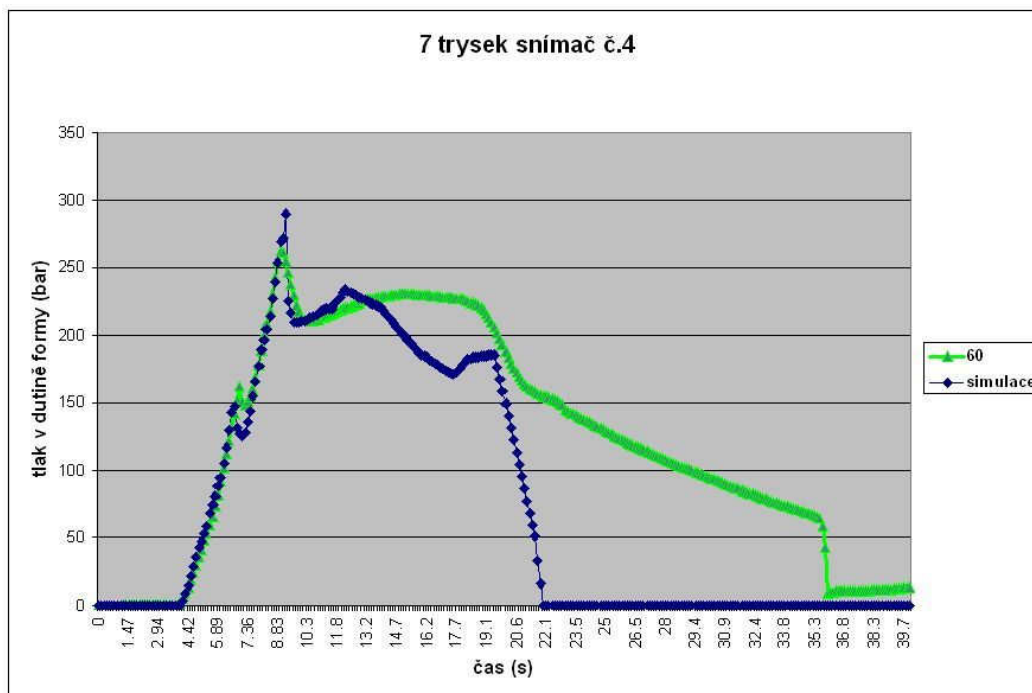
Z výše uvedených porovnání je zřejmé, že simulovaná fáze vstřiku je velmi podobná reálnému stavu. Nepatrné rozdíly mohou způsobovat drobná kolísání ve výsledné tloušťce stěny reálného dílu či tlakové ztráty v hydraulickém systému vstřikovacího stroje, které způsobují pomalejší otevření uzavíratelné trysky.

Následuje porovnání reálných a simulovaných tlakových průběhů z měřících míst nástroje pro vybrané nastavení dotlakové fáze. Z vyráběných dílů byl pro porovnání zvolen díl č.60, kterému odpovídá nastavená doba dotlaku 14s s dotlakovým profilem 65-60-50 bar.



Obr.106: Porovnání tlakových průběhů v reálných a simulovaných podmínkách pro oblast snímače č.1

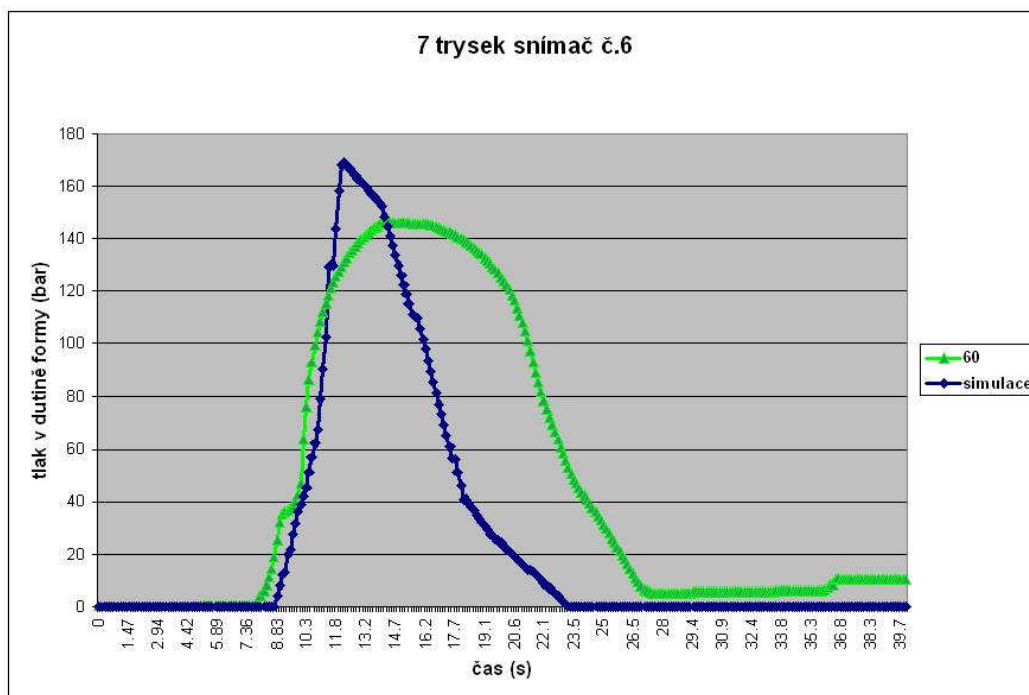
Jak je z obr.106 patrné, v čase 2,8s, kdy byly otevírány s postupem taveniny další trysky, jsou simulované tlakové špičky nižší včetně výraznějšího poklesu tlaku ve virtuální dutině nástroje. Ještě markantnější rozdíl byl zaznamenán v čase 6,7s, kdy dochází k poslednímu otevření trysek. V tomto čase byla dosažená tlaková špička v případě simulovaného procesu nižší o 34 bar a pokles tlaku při otevření trysek 49 bar oproti poklesu o 34 bar v případě reálného měření. Tyto odchylky mohou být způsobeny jednak drobným časovým rozdílem v otevření trysek, dále kolísáním tloušťky stěny reálného nástroje v porovnání s datovým stavem a v neposlední řadě mohou být rozdíly způsobeny vlivem vstřikovací jednotky stroje. Pro simulace nebyla v simulačním programu nalezena daná vstřikovací jednotka a tak musela být použita jednotka univerzální. Tomu může také napovídat rozdílná hodnota při přepnutí na dotlakovou fázi, kdy simulace vykazovala tlakovou špičku o 29 bar vyšší než v případě reálného měření. V oblasti dotlakové fáze je patrný mnohem plynulejší průběh tlaku u reálného měření a také mírnější a plynulejší pokles tlaku na konci dotlakové fáze. To může být způsobeno stlačitelností taveniny, kdy při poklesu tlaku mohou být tyto výkyvy částečně kompenzovány díky akumulaci tlaku ve výrobku. V softwaru není stlačitelnost taveniny zohledněna. Procentuelní rozdíl plochy pod simulovanou křivkou vůči reálnému průběhu tlaku činil 5,2%.



Obr.107: Porovnání tlakových průběhů v reálných a simulovaných podmínkách pro oblast snímače č.4

Pro oblast tlakového snímače č.4 byla situace v oblasti vstřiku z hlediska tendencí podobná oblasti snímače č.1. Při otevření posledních trysek v čase 6,7s byla zaznamenána nižší tlaková špička a výraznější pokles tlaku u simulovaného procesu oproti reálnému měření. Při přepnutí na dotlakovou fázi byla ale naměřena vyšší hodnota tlaku 290 bar u simulovaného procesu oproti 261 bar u reálného měření. V dotlakové fázi byla ale situace výrazně odlišná od oblasti snímače č.1. Simulovaný průběh tlaku zpočátku odpovídal reálnému průběhu tlaku, ale záhy vykazoval výraznou disharmonii a klesal výrazně rychleji. Procentuelní rozdíl plochy pod simulovanou křivkou vůči reálnému průběhu tlaku činil 38,1%. Jak již bylo v kapitole 3.7.2 konstatováno, je oblast snímače č.4 pro variantu sedmi uzavíratelných trysek tlakově předdimenzována. Dále bylo také zjištěno, že kratší čas působení taveniny na dané místo před počátkem dotlakové fáze má vliv na výraznější působení dotlaku na dané místo a tedy na výslednou tloušťku stěny. Zároveň oproti oblasti snímače č.1 může v těchto pohyblivých tvarových částech nástroje docházet v závislosti na konstrukci nástroje k drobnému obousměrnému pohybu tvárníkové strany vyvolanému působením tlaku taveniny na danou tvarovou část nástroje během fáze vstřiku i dotlaku. Kombinace výše uvedených faktorů spolu s absencí zohlednění stlačitelnosti taveniny během simulací může způsobit tak

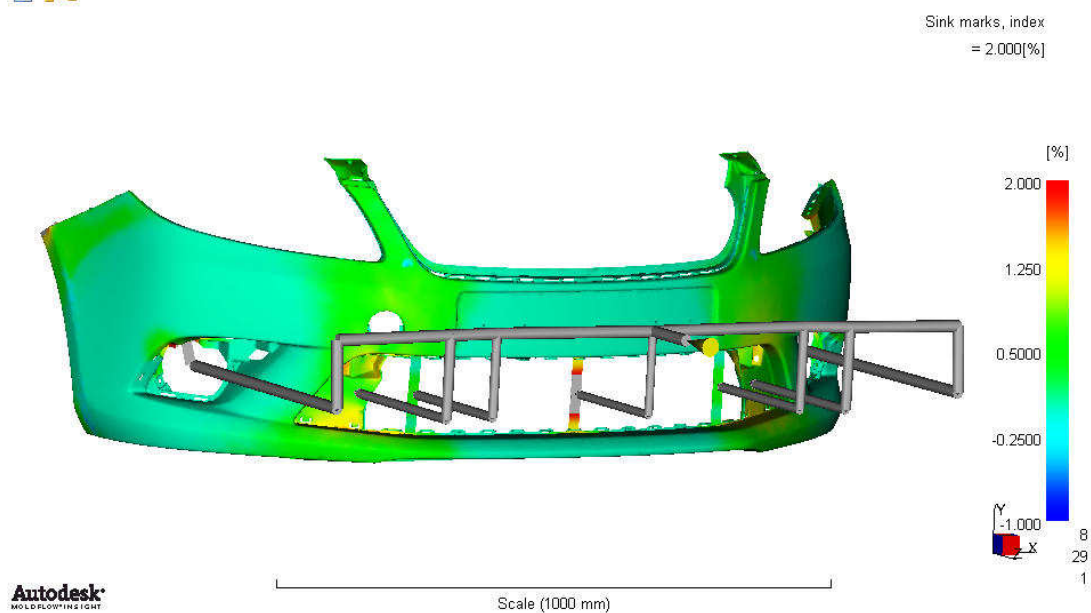
výraznou disharmonii mezi simulovaným a měřeným reálným průběhem tlaku v dutině nástroje.



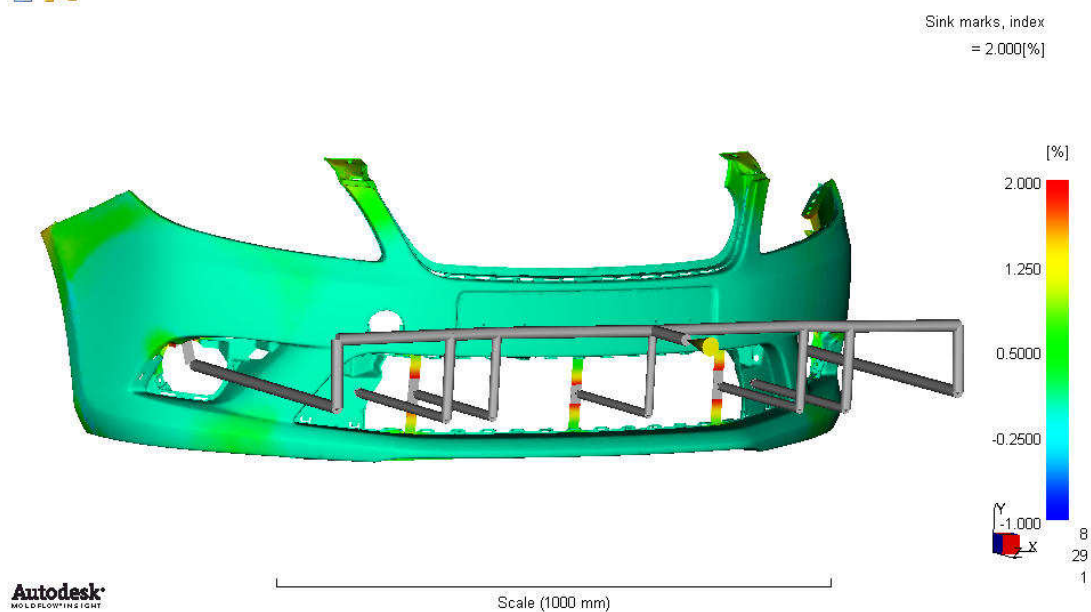
Obr.108: Porovnání tlakových průběhů v reálných a simulovaných podmínkách pro oblast snímače č.6

V oblasti tlakového snímače č.6 je patrný zejména rozdíl v oblasti dotlaku, kdy simulovaný průběh tlaku vykazoval ostrou tlakovou špičku s hodnotou 172 bar oproti reálnému tlakovému průběhu, u kterého byla naměřena nejvyšší hodnota tlaku 148 bar. Dále se průběhy liší rychlostí poklesu tlaku, kde simulovaný průběh tlaku v dutině nástroje, jako v případě oblasti snímače č.4, klesal mnohem dříve. Procentuelní rozdíl plochy pod simulovanou křivkou vůči reálnému průběhu tlaku činil 35,8%.

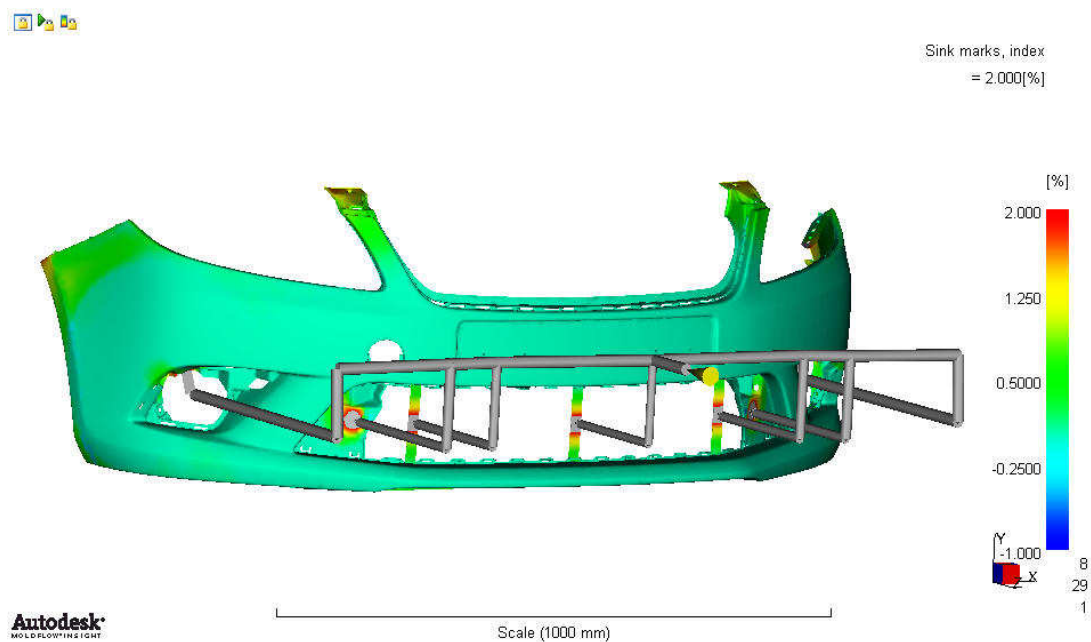
Následují výsledky optimalizačních simulací za účelem nalezení a doporučení neoptimálnějšího počtu vstřikovacích bodů. Pro hodnocení byl použit index potenciálního výskytu propadlin. Tento je kalkulován pro každý element v okamžiku, kdy místní tlak během dotlakové fáze poklesne na nulovou hodnotu a porovnává, jak hodně je materiál v daném místě a okamžiku nezatuhlý a ovlivněný dotlakovou fází.



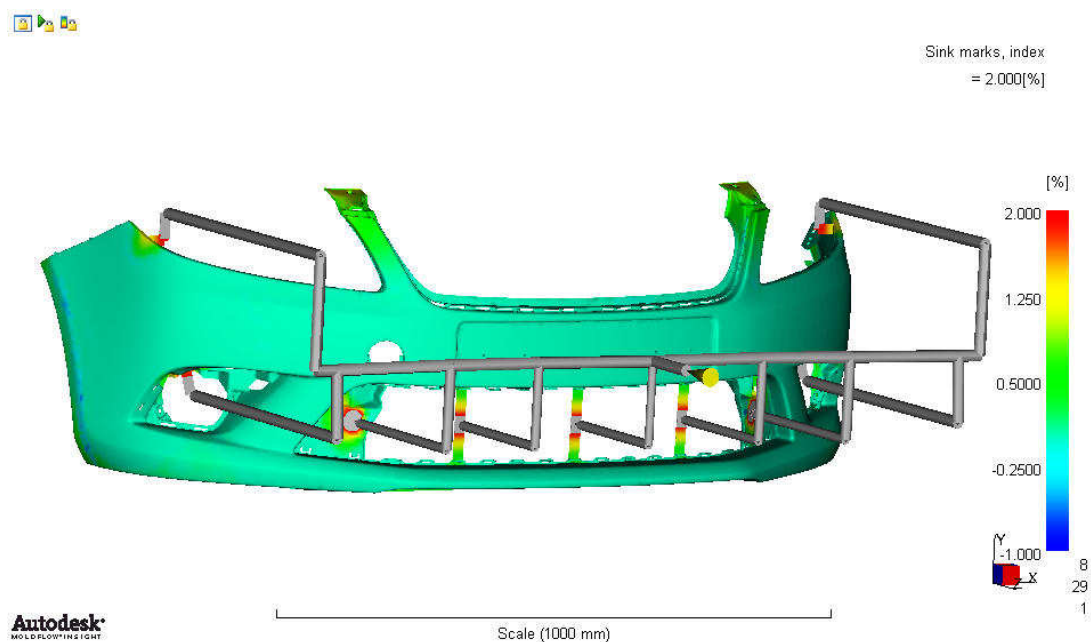
Obr.109: Index výskytu propadlin pro variantu tří uzavíratelných trysek



Obr.110: Index výskytu propadlin pro variantu pěti uzavíratelných trysek



Obr.111: Index výskytu propadlin pro variantu sedmi uzavíratelných trysek



Obr.112: Index výskytu propadlin pro variantu devíti uzavíratelných trysek

Z výše zkoumaných variant se jako nejméně vhodná jeví varianta tří uzavíratelných trysek (viz obr.109), neboť v oblasti tlakového snímače č.4 chybí tryska, která by tuto oblast zejména v dotlakové fázi ovlivňovala. Tato oblast je znázorněna zelenou a žlutou barvou, která signalizuje kladné hodnoty indexu propadlin. Při zohlednění kvalitativního hodnocení vyrobených dílů během

experimentu a výsledků simulací se jako neoptimálnější jeví varianta devíti uzavíratelných trysek. U této varianty bylo optimalizováno rozložení trysek v okolí registrační značky, které povede ke snížení maximální hodnoty tlaku zejména v oblasti snímače č.1. Dále byly přidány trysky do oblasti předních světlometů, které posílily plnění dílu na konci tokové dráhy a posílily v této oblasti také fázi dotlakovou, což by mělo vést k možnosti užití nižších dotlakových profilů a ke zkrácení doby dotlaku.

3.9 Diskuze výsledků experimentálního měření

Stěžejní částí experimentálního měření byl výzkum nejvhodnějšího procesního pole vstřikování velkorozměrového dílu v závislosti na vybraných procesních parametrech a na počtu plnicích míst. Z procesních parametrů, významně ovlivňujících průběh tlaku uvnitř dutiny nástroje a současně výslednou kvalitu vyráběných dílů, byla zvolena doba dotlaku a velikost dotlaku. Výstupem této části experimentu je grafické znázornění i matematická formulace průměrné velikosti procesní plochy v závislosti na počtu plnicích míst. Dále průměrné velikosti procesní plochy v závislosti na době dotlaku a optimální velikost dotlaku pro výrobu velkorozměrového dílu. Zkoumán byl také vliv dotlaku a počtu plnicích míst na výslednou tloušťku stěny dílu se současným hodnocením pevnosti ve stříhu v závislosti na zvoleném měřicím místě.

V navazující části experimentu bylo prostřednictvím krátkodobé zkoušky způsobilosti procesu konfrontováno přepínání na dotlak od dráhy vstřikovací jednotky s přepínáním na dotlak pomocí tlaku uvnitř dutiny nástroje.

Pro vstřikování velkorozměrových výrobků bylo následně evaluováno tlakové řízení uzavíratelných trysek během fáze vstřiku při použití jednotky CoMo.

V neposlední řadě byly po vyhodnocení korelace simulací s experimenty provedeny další vývojové simulace za účelem stanovení neoptimálnějšího počtu plnicích míst pro vstřikovací nástroje tohoto typu.

Rozbor monitorizace tlakových procesů

Základní členění bylo zvoleno podle počtu uzavíratelných trysek, což může symbolizovat tři tvarově identické nástroje s různým počtem vtoků. Pro každou z těchto tří variant byly postupně nastaveny čtyři různě dlouhé doby dotlaku, přičemž jednotlivé varianty doby dotlaku byly složeny z deseti různých nastavení

velikosti dotlaku. Celkem bylo v této fázi vyrobeno 123 nárazníků pro kvalitativní hodnocení a následné zkoušky.

Ze všech naměřených tlakových křivek vyplývá, že nejvyšší hodnota vnitřního tlaku 513 bar byla naměřena během fáze vstřiku tlakovým snímačem č.1 u varianty vstřikování pomocí tří uzavíratelných trysek. Tyto výsledky souvisí s tokovou dráhou, kterou musí tavenina urazit k následující trysce a platí tedy, čím delší dráha toku, tím vyšší naměřená hodnota vnitřního tlaku. V oblasti tlakového snímače č.4 bylo pro variantu tří trysek zjištěno, že je tato oblast tlakově poddimenzována, což se projevilo zvýšeným výskytem propadlin a nutností užití vyšších dotlakových profilů pro jejich eliminaci. Naopak pro variantu sedmi uzavíratelných trysek byly v tomto místě naměřeny vyšší hodnoty tlaku než v místě snímače č.1. Při porovnání variant počtu uzavíratelných trysek vztahujících se ke snímači č.6 se ukázalo, že snímané tlakové špičky jsou bez výrazných rozdílů nejen ve fázi vstřiku, ale také v dotlakové fázi. To je způsobeno tím, že tryska nejvíce ovlivňující tuto oblast je společná pro všechny varianty a tudíž celkový rozdílný počet uzavíratelných trysek nástroje nehraje v této oblasti významnou roli.

Z vyhodnocení naměřených tlakových špiček u jednotlivých snímačů vyplývá, že nejméně vyhovující je z hlediska tlakových poměrů uvnitř nástroje varianta tří trysek. Jako neoptimálnější z hodnocených se jeví varianta pěti trysek, jelikož u varianty sedmi trysek je tlakově předdimenzována oblast v okolí snímače č.4 a tlaková špička v okolí snímače č.1 není výrazně nižší v porovnání s variantou pěti trysek. To je způsobeno nerovnoměrným rozložením trysek. Při předpokladu rovnoměrného umístění uzavíratelných trysek je možno usuzovat, že by varianta sedmi trysek byla ze zkoumaných variant neoptimálnější.

Po kvalitativním hodnocení vyrobených dílů a převedení výběru do grafů obsahujících tlakové křivky byly tímto vymezeny oblasti nastavení parametrů výroby dobrých dílů resp. oblasti s výskytem propadlin a oblasti s výskytem zástřiků. Následovala zvolená metoda regresní analýzy pro výpočet plochy pod křivkou jednotlivých tlakových průběhů. Při porovnání průměrné velikosti procesních ploch reprezentujících výskyt dobrých dílů v závislosti na počtu vtoků bylo zjištěno, že varianta pěti trysek dosáhla plochy 1,9-krát větší než varianta tří trysek, jak je také patrné z obr.82. Ještě výraznějšího rozdílu dosáhla varianta sedmi trysek, u které byla plocha 2,5-krát větší než u varianty tří trysek. Po provedení logaritmické regresní analýzy, viz obr. 83, byl stanoven následující vztah popisující vliv počtu trysek na výslednou velikost průměrné procesní plochy.

$$S_{pp} = 2124,3 \cdot \ln(n_t) - 1124,8$$

kde S_{pp} - značí průměrný obsah procesní plochy

n_t - představuje počet trysek ve vstřikovacím nástroji

Minimální doporučený počet trysek pro velkorozměrové nástroje typu předního nárazníku byl stanoven na 5 uzavíratelných trysek.

Další zkoumanou proměnnou byla použitá doba dotlaku. Z ekonomického hlediska by samozřejmě nejvíce vyhovovala doba dotlaku co nejkratší. Z procesního a kvalitativního hlediska se při porovnání průměrných procesních ploch pro vyrobení dobrého dílu v závislosti na použité době dotlaku nejméně vhodnou jevila doba dotlaku 8s, která ve větší míře vyžadovala použití vyšších dotlakových profilů. Varianta s dobou dotlaku 14s dosáhla průměrné procesní plochy o cca 43% větší. Největší plocha byla dosažena při době dotlaku 17s. Nárůst plochy oproti variantě doby dotlaku 8s činil 70%. Neoptimálnější ze zkoumaných variant se jeví doba dotlaku 17s. Po provedení lineární regrese, viz obr.85, byla vyvozena následující závislost průměrné procesní plochy pro vyrobení dobrých dílů na použité době dotlaku.

$$S_{pp} = 114,13 \cdot t_d + 744,05$$

kde S_{pp} - značí průměrný obsah procesní plochy

t_d - představuje dobu dotlaku

Třetí zkoumanou proměnnou bylo nastavení velikosti dotlaku. Hodnotícím kritériem byla zvolena četnost výskytu daných nastavení velikosti dotlaku nutných pro vyrobení dobrého dílu. Nejčtenější zastoupení ze všech zkoumaných dotlakových profilů, jak je také patrné z obr. 86, má varianta 70 – 60 – 50 bar, což vztaženo procentuálně k použitému tlaku v momentě přepnutí na dotlak znamená 55% - 48% - 40%.

Rozbor vlivu vybraných proměnných na výslednou tloušťku stěny

Rozložení a počet trysek má významný vliv nejen na průběh tlaku v daném díle, ale také na výslednou tloušťku stěny v jednotlivých místech, což je v tomto případě zejména markantní v oblasti tlakového snímače č.4. Při použití tří trysek se naměřené pole v této oblasti pohybuje z velké části pod nominální hodnotou tloušťky stěny, jelikož ostatní aktivní trysky jsou až příliš vzdálené. Působení dotlakové fáze v oblasti snímače č.4 je nedostatečné a tedy potlačování

objemového smrštění plastu v této oblasti nevýrazné. Naproti tomu u varianty sedmi trysek se pole naměřených hodnot pohybuje z větší části nad nominální hodnotou tloušťky stěny. V tomto případě oblast ovlivňuje více trysek najednou a tloušťka stěny se dostává již při nižších nastaveních dotlaku do expanze. Dále bylo také vyvozeno, že nezáleží tolik na době dotlaku, ale významnějším faktorem je velikost dotlaku. Doba dotlaku způsobuje pouze dřívější či pozdější překročení nominální hodnoty tloušťky stěny.

Provedená lineární regrese v grafu průměrných tloušťek dílu v závislosti na měřeném místě a velikosti dotlaku na obr.91 ukazuje, že nejmenší směrnici má přímka z místa snímače č.1. Následuje směrnice přímky z měřicího místa č.4, která je cca 2,6-krát vyšší a výsledná směrnice z oblasti snímače č.6 je 3-krát vyšší než z místa snímače č.1. Na strmost výsledné přímky má největší vliv místo měření. Není to však samotné místo měření, ale čas působení tlaku taveniny na dané místo resp. čas vstřiku, který stojí za ovlivněním strmosti přímky. Čím déle je takové místo vystaveno působení tlaku taveniny ještě před samotným přepnutím na dotlakovou fázi, tím užší je nezatuhlé jádro taveniny a tím menší je z hlediska dotlaku jeho výsledné působení na tuto oblast.

Hodnocení pevnosti ve stříhu

Pro tuto část experimentu byly vybrány vzorky z oblasti snímače č.1 a snímače č.6, což odpovídá oblastem z počátku a konce plnění. Díly vyrobené pomocí sedmi uzavíratelných trysek vykazují nejvyšší hodnoty pevnosti ve stříhu v porovnání s variantou pěti trysek resp. tří trysek. Zároveň je možno konstatovat, že hodnoty pevnosti ve stříhu klesají nejen s narůstající dráhou toku, ale také se vzrůstající časovou prodlevou od počátku působení taveniny na dané místo, jak je patrné z obr.94. Lineární regresí průměrných pevností ve stříhu v závislosti na zpoždění počátku působení taveniny na měřicí místo byla zjištěna u varianty sedmi trysek směrnice -0,1305. Pro variantu pěti trysek byla hodnota směrnice -0,132 a u varianty tří uzavíratelných trysek -0,143. Hodnota směrnice tedy závisí nejen na naměřených hodnotách pevnosti ve stříhu, ale také na zpoždění počátku působení taveniny na měřicí místo.

Hodnocení způsobilosti procesu krátkodobou zkouškou

Pro hodnocení způsobilosti procesu krátkodobou zkouškou byly použity indexy způsobilosti procesu, kdy zkoumaným parametrem byla zvolena hmotnost vyráběných dílů. U obou variant způsobu přepínání na dotlakovou fázi byly indexy způsobilosti procesu stanoveny na základě kontinuální výrobní série 50 ks viz příloha č.6. Při přepínání na dotlakovou fázi pomocí vnitřního tlaku v dutině nástroje byly dosaženy vyšší hodnoty indexu $C_p = 1,88$ i $C_{pk} = 1,56$ v porovnání s přepínáním na dotlak od vstřikovacího stroje, kde bylo dosaženo výsledné hodnoty indexu $C_p = 1,56$ a $C_{pk} = 1,42$. Zároveň bylo při přepínání na dotlak pomocí vnitřního tlaku v dutině nástroje dosaženo menší směrodatné odchylky viz obr.95 a obr.96. Na základě výše uvedených výsledků je možné pro kaskádové vstřikování velkorozměrových dílů potvrdit, že přepínání na dotlak pomocí vnitřního tlaku v dutině nástroje je přesnější a povede za určitých podmínek k vyšší stabilitě výroby.

Tlakové řízení uzavíratelných trysek při plnění dutiny nástroje

Jednalo se o způsob řízení uzavíratelných trysek pomocí sledování tlaku uvnitř dutiny nástroje. Do nástroje bylo instalováno sedm tlakových snímačů, které byly pomocí jednotky CoMo propojeny skrze speciální rozhraní se solenoidy uzavíratelných trysek, jak je popsáno v kapitole 3.3.1. S postupujícím čelem taveniny od počáteční trysky byly postupně otevřeny další trysky na základě informace o dosažení požadovaného tlaku u příslušného tlakového snímače. Následovalo porovnání kvality dílů vyrobených pomocí standardního i tlakového řízení uzavíratelných trysek. Z porovnání uvedeném v kapitole 3.7.8 vyplývá, že díly vyrobené tlakovým řízením pomocí jednotky CoMo jsou kvalitativně plně srovnatelné s díly, které jsou vyrobeny standardním řízením uzavíratelných trysek od vstřikovacího stroje. Potvrzuje to také porovnání s oblastmi, které vymezují výskyt dobrých dílů. U všech měřících míst byla zkoumaná křivka uvnitř oblasti ohraničující výskyt dobrých dílů. Bohužel nutno na druhou stranu podotknout, že tlakové řízení procesu vstřikování pomocí jednotky CoMo je mnohem složitější a pracnější než je tomu u standardního řízení vstřikovacím strojem.

Softwarové simulace

Simulace procesu vstřikování velkorozměrového dílu byly prováděny za pomoci softwaru Moldflow Plastics Insight 2010 dodávaný firmou Autodesk. V první části byly simulace zaměřeny na proces plnění dutiny nástroje a následnou dotlakovou fázi pro přímé porovnání s výstupy monitorizace. Po porovnání simulace plnění s fyzickým testem plnění dutiny nástroje je možno konstatovat, že simulovaná fáze vstřiku je téměř totožná s reálným stavem. Nepatrné rozdíly mohou způsobovat tlakové ztráty v hydraulickém systému vstřikovacího stroje nebo drobná kolísání ve výsledné tloušťce stěny reálného dílu. V dotlakové fázi byly zaznamenány rozdíly zejména v oblasti tlakového snímače č.4 a snímače č.6, u kterých byl procentuelní rozdíl plochy pod simulovanou křivkou vůči reálnému průběhu tlaku 38,1% resp. 35,8%. To může být způsobeno nezohledněním stlačitelnosti taveniny v kombinaci s kratším časem působení taveniny na dané místo před počátkem dotlakové fáze, která má vliv na výraznější působení dotlaku na dané místo. Dalším faktorem mohl být také možný nepatrný obousměrný pohyb části strany tvárníku vyvolaný působením tlaku taveniny na danou tvarovou část nástroje během fáze vstřiku i dotlaku. Naproti tomu v okolí tlakového snímače č.1 byl zaznamenán procentuelní rozdíl plochy pod simulovanou křivkou vůči reálnému průběhu tlaku pouze 5,2%, jak je vidno z obr.106. Tato část tvárníku byla pevná a proto tedy případný pohyb tvarových částí zde byl vyloučen. Dále je oblast tlakového snímače č.1 mnohem déle ve fázi vstřiku vystavena působení taveniny před samotnou dotlakovou fází, zužuje se plastické jádro v tloušťce stěny dílu a proto je vliv případné stlačitelnosti taveniny výrazněji omezen. V poslední části simulací byl optimalizován počet uzavíratelných trysek jako doporučení pro konstrukci velkorozměrových nástrojů tohoto typu. Výsledkem byl návrh nástroje obsahující devět uzavíratelných trysek viz obr.112.

4 ZÁVĚR

Trvalé sledování nových trendů, vývoj nekonvenčních technologií nebo inovace stávajících je stále více nutností pro zachování konkurenceschopnosti každé průmyslové společnosti v globalizovaném světě. Jsou to také způsoby řízení či vyšší stupně automatizace výroby, které se zavádí za účelem zvýšení stability výrobních procesů resp. snížením jejich zmetkovitosti, jelikož důraz na zkvalitňování a zefektivňování výroby neustále sílí společně s tlakem na co nejnižší koncovou cenu výrobku.

V současnosti není publikována odborná literatura zabývající se komplexně problematikou tlakových procesů kaskádového vstřikování velkorozměrových dílů. Předložená disertační práce si klade za cíl výzkum nejvhodnějšího procesního pole při vstřikování velkorozměrových dílů v závislosti na vybraných proměnných s důrazem na výslednou kvalitu dílu. Výsledky výzkumu by měly sloužit jako obecná doporučení pro konstrukci a provoz nástrojů pro vstřikování velkorozměrových výrobků tohoto typu.

Teoretická část disertační práce popisuje nejprve stručně technologii vstřikování, dále reologické vlastnosti tavenin plastů. Poté podrobněji rozebírá průběhy tlaků napříč vstřikovacím procesem s přihlédnutím k vlivu vybraných technologických parametrů na průběh tlaku v dutině nástroje. Následuje kapitola věnovaná řízení vstřikovacího procesu včetně popisu způsobů přepínání na dotlak a jeho vliv na kolísání hmotnosti vyráběného dílu. Dále je v teoretické části kapitola popisující kaskádové vstřikování, vstřikovací nástroje a kapitola věnovaná problematice zpracování naměřených dat se zaměřením na způsob výpočtu plochy pod naměřenou tlakovou křivkou. Teoretická část je zakončena kapitolou zabývající se hodnocením způsobilosti vstřikovacího procesu.

Experimentální část byla zaměřena na monitorizaci tlakových procesů pro vybrané technologické parametry, které významně ovlivňují průběh vnitřního tlaku v dutině nástroje během vstřikování resp. výslednou kvalitu vyráběného dílu. Z naměřených tlakových křivek byly na základě kvalitativního hodnocení vyrobených dílů stanoveny přechodové křivky vymezující oblast nastavení daného parametru pro výrobu dobrého dílu resp. ohraničení oblastí s výskytem zástříků a oblastí s výskytem propadlin. Poté následovalo vyhodnocení všech proměnných v závislosti na velikosti získaných procesních ploch a stanovení významnosti jednotlivých parametrů při zohlednění kvalitativního hlediska. Zkoumán byl i vliv dotlaku a počtu vtoků na výslednou tloušťku stěny vyrobeného dílu a také vliv na hodnoty pevnosti



ve stříhu. Dále bylo provedeno porovnání způsobů přepínání na dotlakovou fázi a jejich vliv na výslednou způsobilost procesu. Následně bylo evaluováno úplné tlakové řízení uzavíratelných trysek ve fázi vstřiku pomocí jednotky CoMo. Nakonec byly provedeny simulace za účelem stanovení neoptimálnějšího počtu plnicích míst.

Dosažené výsledky lze shrnout do následujících bodů:

- Obsah procesní plochy se výrazně zvětšuje s narůstajícím počtem vtoků
- Obsah procesní plochy se výrazně zvětšuje s narůstající dobou dotlaku
- Čas vstřiku, počet trysek a velikost dotlaku a mají významný vliv na výslednou tloušťku stěny dílu
- Přepínání na dotlakovou fázi pomocí tlaku uvnitř dutiny nástroje vykazuje vyšší hodnoty indexů způsobilosti procesu v porovnání s konvenčním způsobem přepínání na dotlak
- Tlakové řízení uzavíratelných trysek ve fázi vstřiku pomocí jednotky CoMo neposkytuje žádnou výhodu z hlediska procesu samotného a je uživatelsky náročnější
- Dle výstupů ze optimalizačních simulací je optimální počet uzavíratelných trysek 9

Přínos pro vědu

Na základě výsledků uvedených v této disertační práci je možné za přínos pro vědu označit následující:

- Výzkum nejvhodnějšího procesního pole pro vstřikování velkorozměrových dílů s důrazem na výslednou kvalitu vyráběných dílů
- Formulace vztahu mezi počtem uzavíratelných trysek a obsahem procesní plochy
- Formulace vztahu mezi dobou dotlaku a obsahem procesní plochy
- Pro velkorozměrové nástroje potvrzena vyšší stabilita výroby při přepínání na dotlak pomocí tlaku uvnitř dutiny nástroje



Přínos pro praxi

Na základě výsledků uvedených v této disertační práci je možné za přínos pro praxi označit následující:

- Doporučení minimálního počtu uzavíratelných trysek pro velkorozměrové nástroje tohoto typu
- Doporučení optimální velikosti dotlaku, doby dotlaku a zkrácení času vstřiku jak pro samotný proces vstřikování, tak pro zohlednění při konstrukci vstřikovacího nástroje
- Na základě experimentálního měření a simulací vyvození optimálního počtu trysek
- Pro velkorozměrové nástroje potvrzena vyšší stabilita výroby při přepínání na dotlak pomocí tlaku uvnitř dutiny nástroje
- Standardní řízení uzavíratelných trysek ve fázi vstřiku pomocí vstřikovacího stroje je prozatím výhodnější



5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LENFELD, P. *Technologie II., zpracování plastů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-037-X.
- [2] KOZÁR, M. *Hodnocení účinnosti temperačního systému u velkorozměrových forem* (Diplomová práce). Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2003
- [3] BLAŽEK, M. *Rozbor vstříkací formy z tepelného a teplotního hlediska*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1997
- [4] SOVA, M. *Termoplasty v praxi*. Praha: Verlag Dashofer s.r.o., 2001. ISBN 80-86229-15-7
- [5] ULÍK, J. *Monitorovanie priebehu tlaku v nástroji pri vstrekovaní plastov*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2005.
- [6] LENFELD, P. *Teplotní pole ve vstříkacích formách* (Disertační práce). Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1997
- [7] <http://www.kistler.com>
- [8] Krebs, J. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2001. ISBN 80-7083-449-8
- [9] SEIDL, M. *Aplikace systému „Dynamic Feed“ u kaskádového vstřikování navybrané formě* (Diplomová práce). Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007
- [10] <http://www.synventive.com>
- [11] BICHLER, M. *Qualitätssicherung beim Spritzgiessen*. Heidelberg: Hüthig GmbH & Co.KG, 2004. ISBN 3-7785-3021-6
- [12] Prospektová dokumentace firmy Kistler
- [13] PŮTA, J. *Řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstříkacího nástroje* (Disertační práce). Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008



- [14] HRDÝ, J. *The Modern Methods of Data Smoothing*. Brno: VUT Brno, 2003.
http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2003/fsbornik/02-Mgr/05-Theoretical_Electrical_and_Electronic_Engineering/01-hrdy_jan.pdf
- [15] LIKEŠ, J., MACHEK, J. *Matematická statistika*. Praha: SNTL, 1988. ISBN 0401188
- [16] JOHANSEN, I. *Manuál k programu Graph v 4.3.*, 2007
- [17] <http://cs.wikipedia.org/wiki/> - kategorie: Integrální počet / Numerická matematika
- [18] *Hodnocení způsobilosti procesů* – prezentace
[www.elearn.vsb.cz/archivcd/FMMI/MJ/Animace/Animace 14 - PCA.pps](http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FMMI/MJ/Animace/Animace%2014-PCA.pps)
- [19] KUBICA, O. *Návrh systému pravidelného monitoringu indexů způsobilosti procesu dodavatelů* (Diplomová práce). Brno: VUT v Brně, 2007
- [20] BĚHÁLEK, L. *Reologie tavenin termoplastů v průmyslové praxi*, projekt In-Tech, Liberec: Technická univerzita v Liberci
<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Reologie.pdf>
- [21] Program Autodesk Moldflow Insight 2011



6 SEZNAM PUBLIKACÍ

- [1] LUKEŠ, M., LENFELD, P. *Nekonvenční temperace vstřikovacích forem pro výrobu pohledových dílů. Ověřená technologie.* FS - KSP, TU v Liberci, č. KSP-2011-Z/OT-05, aplikace ve společnosti MAGNA Exteriors & Interiors (Bohemia) s.r.o., IČO 26195348, Kubelíkova 604, Liberec 46078

- [2] LUKEŠ, M. *Řízení procesu kaskádového vstřikování u velkorozměrových nástrojů pomocí tlakových snímačů.* In. *Strojírenská technologie.* V tisku. ISSN 1211-4162

- [3] LENFELD, P., BĚHÁLEK, L., AUSPERGER, A., BOBEK, J., SEIDL, M., SEVERA, Z., LUKEŠ, M. *Kompozit se syntetickou polymerní matricí a buničinou ve formě přírodních vláknenných plniv.* Přihláška užitečný vzor a patent; PV 2011-852, PUV 2011-25352.

- [4] LENFELD, P., BĚHÁLEK, L., AUSPERGER, A., BOBEK, J., SEIDL, M., SEVERA, Z., LUKEŠ, M. *Kompozitní materiál s přírodními vláknennými plnivý na bázi buničiny pro výrobu plastových dílů.* Přihláška užitečný vzor a patent; PV 2011-853, PUV 2011-25353;

- [5] LENFELD, P., BĚHÁLEK, L., AUSPERGER, A., BOBEK, J., SEIDL, M., SEVERA, Z., LUKEŠ, M. *Kompozitní materiál s přírodními vláknennými plnivý na bázi konopí pro výrobu plastových dílů.* Přihláška užitečný vzor a patent; PV 2011-855, PUV 2011-25355;

- [6] LENFELD, P., BĚHÁLEK, L., AUSPERGER, A., BOBEK, J., SEIDL, M., SEVERA, Z., LUKEŠ, M. *Kompozitní materiál s přírodními vláknennými plnivý na bázi lnu pro výrobu plastových dílů.* Přihláška užitečný vzor a patent; PV 2011-856, PUV 2011-25356;

- [7] LENFELD, P., BĚHÁLEK, L., AUSPERGER, A., BOBEK, J., SEIDL, M., SEVERA, Z., LUKEŠ, M. *Kompozitní materiál s přírodními vláknennými plnivý na bázi ovčí vlny pro výrobu plastových dílů.* Přihláška užitečný vzor a patent. PV 2011-857, PUV 2011-25357.



7 SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1 - Převodní tabulka pro jednotlivá čísla dílů s nastavením sledovaných parametrů	1
PŘÍLOHA 2 - Tlakové křivky monitorované pro variantu pěti a tří uzavíratelných trysek.....	2
PŘÍLOHA 3 - Kvalitativní hodnocení dílů pro variantu pěti a tří uzavíratelných trysek.....	5
PŘÍLOHA 4 - Vybrané tlakové průběhy vymezující oblast bez vad pro variantu pěti a tří uzavíratelných trysek	7
PŘÍLOHA 5 - Vliv dotlaku a vliv počtu uzavíratelných trysek na výslednou tloušťku stěny vyráběného dílu.....	10
PŘÍLOHA 6 - Hmotnosti vyrobených dílů pro analýzu způsobilosti procesu krátkodobou zkoušku.....	10
PŘÍLOHA 7 - Tabulka průměrných střížných sil pro vybrané vzorky	14

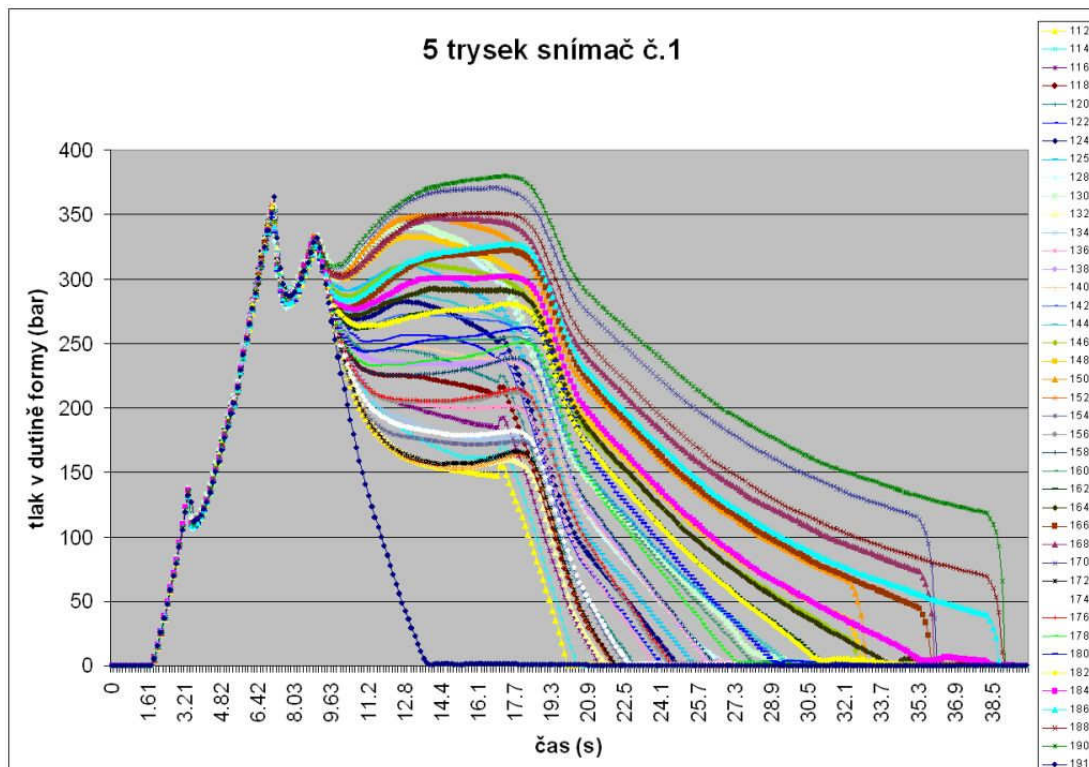


PŘÍLOHA 1

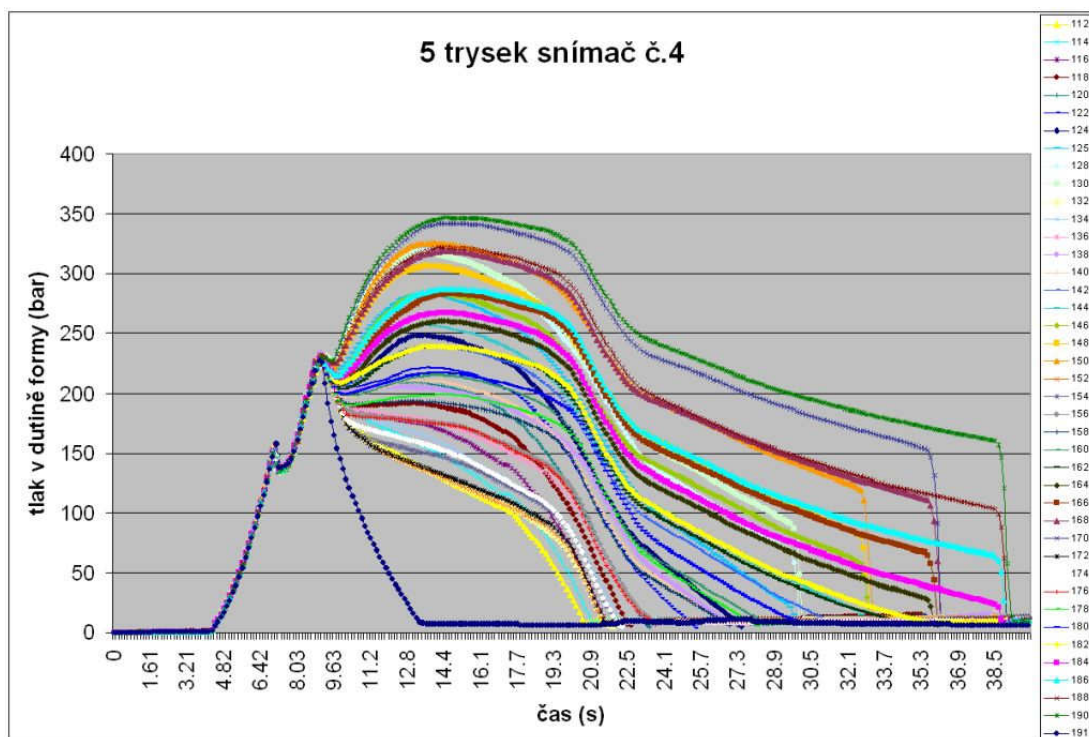
Tabulka s nastavením sledovaných parametrů pro jednotlivá čísla dílů

	7 trysek			5 trysek			3 trysky	
	číslo dílu	profil dotlaku		číslo dílu	profil dotlaku		číslo dílu	profil dotlaku
Dotlak 8 s (členění 3_3_2)	11	50 50 45	Dotlak 11 s (členění 3_4_4)	112	50 50 45	Dotlak 14 s (členění 4_5_5)	202	50 50 45
	14	55 50 50		114	55 50 50		204	55 50 50
	18	60 55 50		116	60 55 50		206	60 55 50
	20	65 60 50		118	65 60 50		208	65 60 50
	22	70 60 50		120	70 60 50		210	70 60 50
	24	75 65 50		122	75 65 50		212	75 65 50
	26	80 65 50		124	80 65 50		214	80 65 50
	28	85 70 50		125	85 70 50		216	85 70 50
	30	90 70 50		128	90 70 50		224	90 70 50
	32	95 75 50		130	95 75 50		226	95 75 50
Dotlak 11 s (členění 3_4_4)	34	50 50 45	Dotlak 14 s (členění 4_5_5)	132	50 50 45	Dotlak 17 s (členění 4_6_7)	228	50 50 45
	36	55 50 50		134	55 50 50		230	55 50 50
	38	60 55 50		136	60 55 50		232	60 55 50
	40	65 60 50		138	65 60 50		234	65 60 50
	42	70 60 50		140	70 60 50		236	70 60 50
	44	75 65 50		142	75 65 50		238	75 65 50
	46	80 65 50		144	80 65 50		240	80 65 50
	48	85 70 50		146	85 70 50		242	85 70 50
	50	90 70 50		148	90 70 50		244	90 70 50
	52	95 75 50		150	95 75 50		246	95 75 50
Dotlak 14 s (členění 4_5_5)	54	50 50 45	Dotlak 17 s (členění 4_6_7)	152	50 50 45	Dotlak 17 s (členění 4_6_7)	250	50 50 45
	56	55 50 50		154	55 50 50		252	55 50 50
	58	60 55 50		156	60 55 50		254	60 55 50
	60	65 60 50		158	65 60 50		256	65 60 50
	62	70 60 50		160	70 60 50		258	70 60 50
	64	75 65 50		162	75 65 50		260	75 65 50
	66	80 65 50		164	80 65 50		262	80 65 50
	68	85 70 50		166	85 70 50		264	85 70 50
	70	90 70 50		168	90 70 50		266	90 70 50
	72	95 75 50		170	95 75 50		268	95 75 50
Dotlak 17 s (členění 4_6_7)	74	50 50 45	Dotlak 17 s (členění 4_6_7)	172	50 50 45	Dotlak 17 s (členění 4_6_7)	270	50 50 45
	76	55 50 50		174	55 50 50		272	55 50 50
	78	60 55 50		176	60 55 50		274	60 55 50
	80	65 60 50		178	65 60 50		276	65 60 50
	82	70 60 50		180	70 60 50		278	70 60 50
	84	75 65 50		182	75 65 50		280	75 65 50
	86	80 65 50		184	80 65 50		282	80 65 50
	88	85 70 50		186	85 70 50		284	85 70 50
	90	90 70 50		188	90 70 50		286	90 70 50
	92	95 75 50		190	95 75 50		288	95 75 50

PŘÍLOHA 2

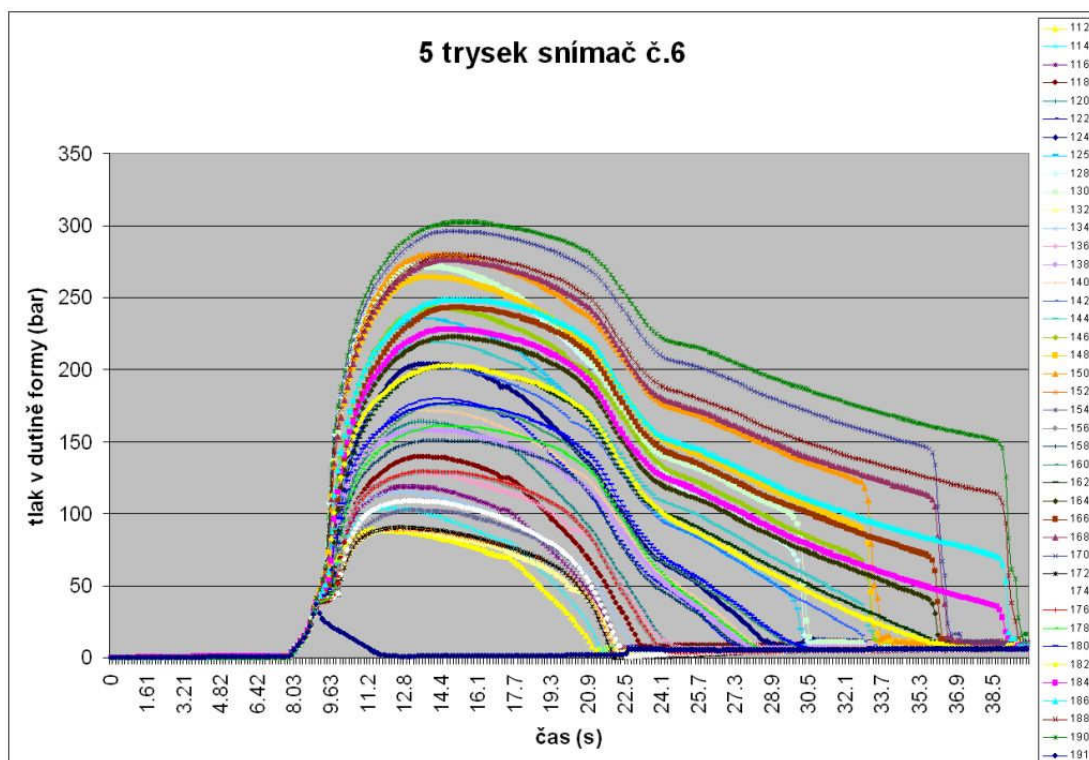


Tlakové křivky monitorované snímačem č.1 pro variantu pěti uz. trysek

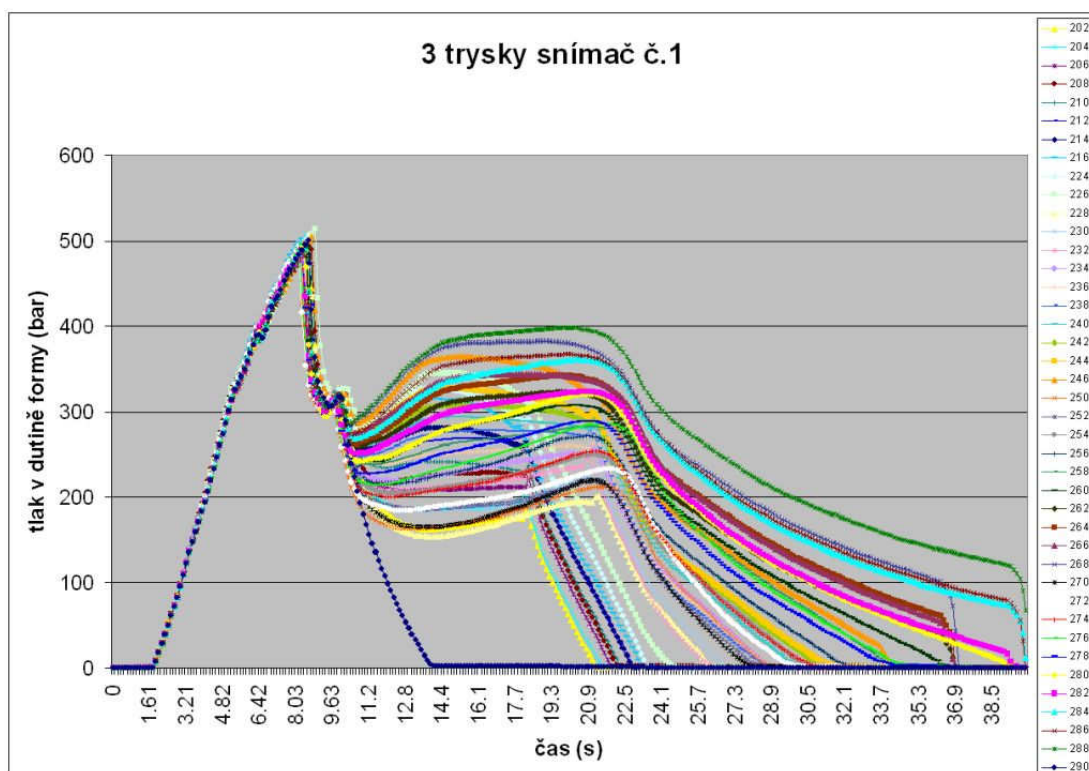


Tlakové křivky monitorované snímačem č.4 pro variantu pěti uz. trysek

PŘÍLOHA 2

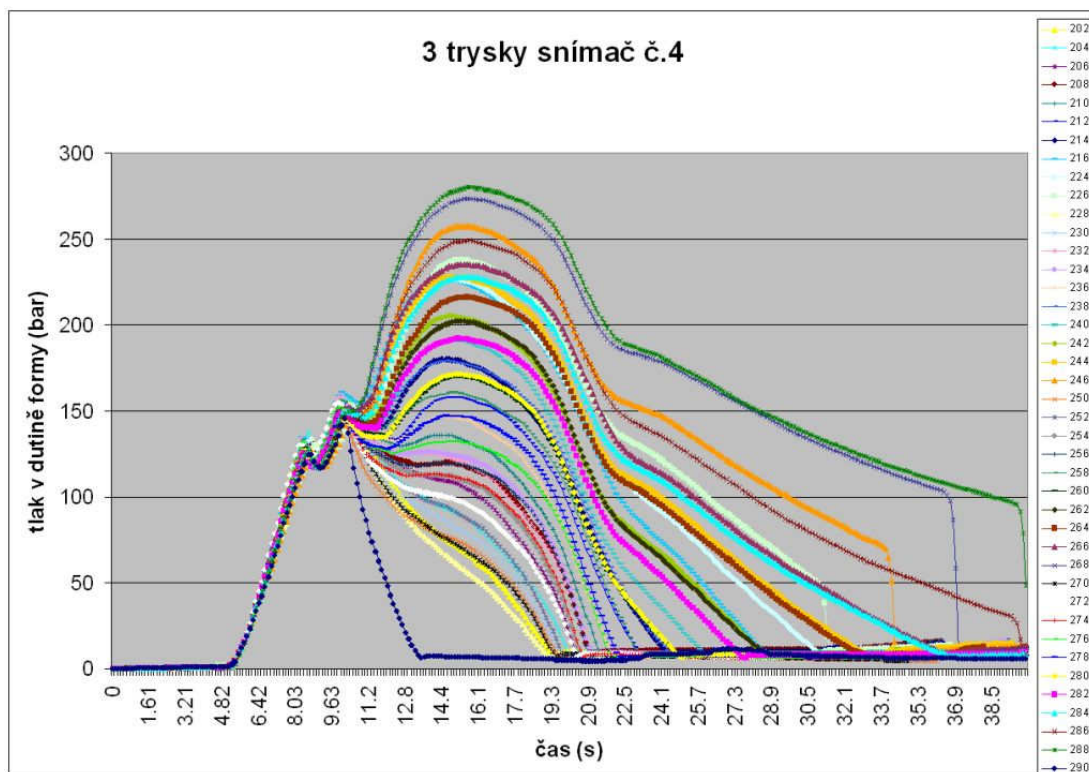


Tlakové křivky monitorované snímačem č.6 pro variantu pěti uz. trysek

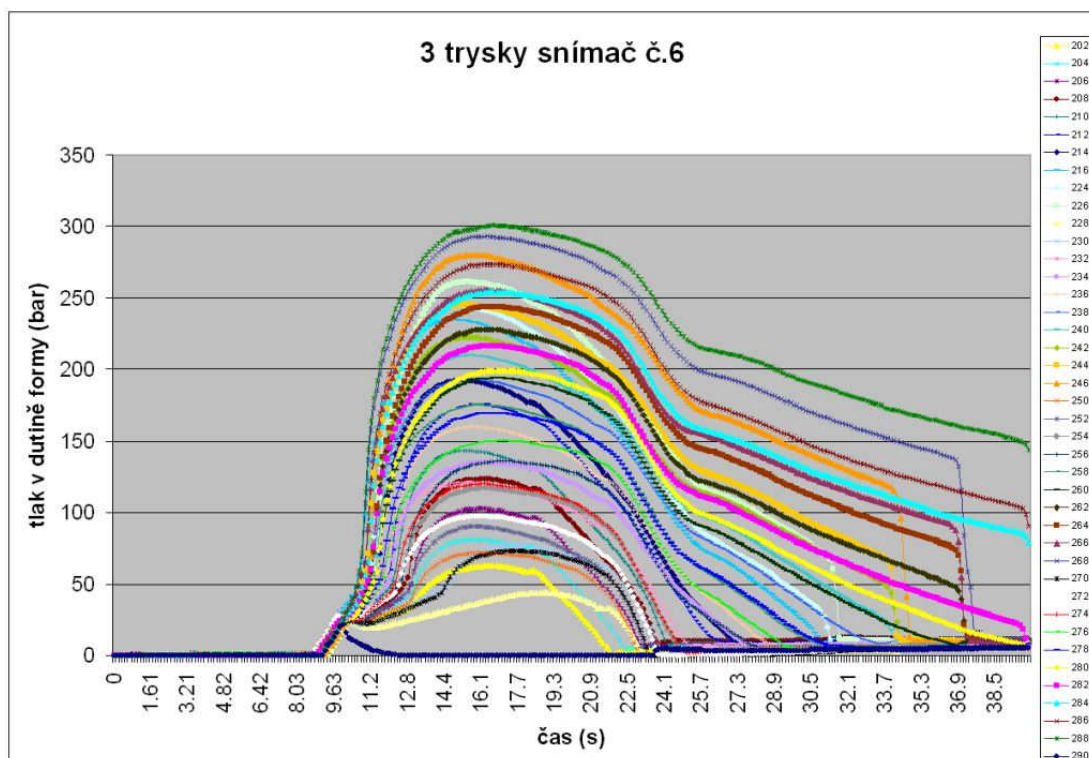


Tlakové křivky monitorované snímačem č.1 pro variantu tří uz. Trysek

PŘÍLOHA 2



Tlakové křivky monitorované snímačem č.4 pro variantu tří uz. trysek



Tlakové křivky monitorované snímačem č.6 pro variantu tří uz. trysek

PŘÍLOHA 3

Kvalitativní hodnocení dílů (doba dotlaku 8s) – verze pěti uz. trysek

číslo dílu	profil dotlaku	chladič	mřížka	mlhovka	světlo	bok	podběh
112	50 50 45	ok	ok	ok	ok	p	ok
114	55 50 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
116	60 55 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
118	65 60 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
120	70 60 50	ok	ok	ok	v	p	ok
122	75 65 50	ok	ok	ok	v	ok	ok
124	80 65 50	ok	ok	v	v	ok	ok
125	85 70 50	ok	ok	v	v	ok	ok
128	90 70 50	ok	ok	z	z	ok	v
130	95 75 50	ok	ok	z	z	ok	v

Kvalitativní hodnocení dílů (doba dotlaku 11s) – verze pěti uz. trysek

číslo dílu	profil dotlaku	chladič	mřížka	mlhovka	světlo	bok	podběh
132	50 50 45	ok	ok	ok	ok	p	ok
134	55 50 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
136	60 55 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
138	65 60 50	ok	ok	ok	ok	ok	ok
140	70 60 50	ok	ok	ok	ok	ok	ok
142	75 65 50	ok	ok	ok	v	ok	ok
144	80 65 50	ok	ok	z	v	ok	ok
146	85 70 50	ok	ok	z	z	ok	v
148	90 70 50	v	ok	z	z	ok	z
150	95 75 50	v	ok	z	z	ok	z

Kvalitativní hodnocení dílů (doba dotlaku 14s) – verze pěti uz. trysek

číslo dílu	profil dotlaku	chladič	mřížka	mlhovka	světlo	bok	podběh
152	50 50 45	ok	ok	ok	ok	p	ok
154	55 50 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
156	60 55 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
158	65 60 50	ok	ok	ok	ok	ok	ok
160	70 60 50	ok	ok	ok	v	ok	ok
162	75 65 50	ok	ok	ok	z	ok	ok
164	80 65 50	v	ok	ok	z	ok	ok
166	85 70 50	v	ok	v	z	ok	ok
168	90 70 50	v	ok	z	z	ok	z
170	95 75 50	v	ok	z	z	ok	z

Kvalitativní hodnocení dílů (doba dotlaku 17s) – verze pěti uz. trysek

číslo dílu	profil dotlaku	chladič	mřížka	mlhovka	světlo	bok	podběh
172	50 50 45	ok	ok	ok	ok	p	ok
174	55 50 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
176	60 55 50	ok	ok	ok	ok	p	ok
178	65 60 50	ok	ok	ok	v	ok	ok
180	70 60 50	ok	ok	ok	v	ok	ok
182	75 65 50	ok	ok	ok	z	ok	ok
184	80 65 50	ok	ok	z	z	ok	v
186	85 70 50	ok	ok	z	z	ok	v
188	90 70 50	v	ok	z	z	ok	z
190	95 75 50	v	ok	z	z	ok	z

PŘÍLOHA 3

Kvalitativní hodnocení dílů (doba dotlaku 8s) – verze tří uz. trysek

číslo dílu	profil dotlaku	chladič	mřížka	mlhovka	světlo	bok	podběh
202	50 50 45	ok	ok	ok	p	p	ok
204	55 50 50	v	ok	ok	p	p	ok
206	60 55 50	v	ok	ok	p	p	ok
208	65 60 50	v	ok	ok	p	p	ok
210	70 60 50	v	ok	ok	ok	p	ok
212	75 65 50	v	ok	ok	ok	ok	ok
214	80 65 50	v	ok	ok	v	ok	ok
216	85 70 50	v	ok	ok	v	ok	ok
224	90 70 50	z	ok	ok	v	ok	v
226	95 75 50	z	ok	z	z	ok	v

Kvalitativní hodnocení dílů (doba dotlaku 11s) – verze tří uz. trysek

číslo dílu	profil dotlaku	chladič	mřížka	mlhovka	světlo	bok	podběh
228	50 50 45	ok	ok	ok	p	p	ok
230	55 50 50	v	ok	ok	p	p	ok
232	60 55 50	v	ok	ok	p	p	ok
234	65 60 50	v	ok	ok	ok	ok	ok
236	70 60 50	v	ok	ok	v	ok	ok
238	75 65 50	v	ok	ok	v	ok	ok
240	80 65 50	z	ok	ok	v	ok	ok
242	85 70 50	z	ok	ok	z	ok	ok
244	90 70 50	z	ok	z	z	ok	ok
246	95 75 50	z	ok	z	z	ok	v

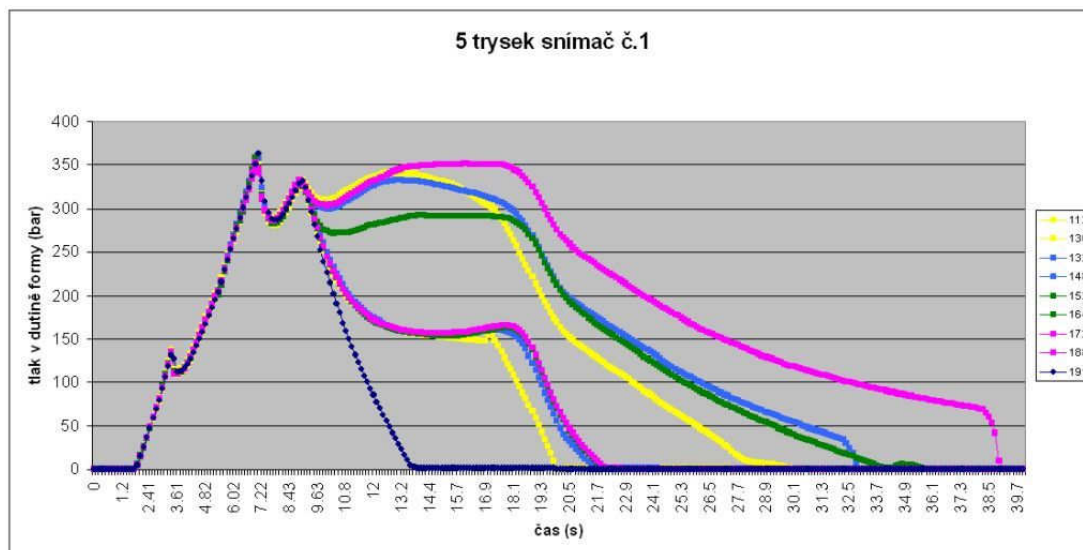
Kvalitativní hodnocení dílů (doba dotlaku 14s) – verze tří uz. trysek

číslo dílu	profil dotlaku	chladič	mřížka	mlhovka	světlo	bok	podběh
250	50 50 45	ok	ok	ok	p	p	ok
252	55 50 50	v	ok	ok	p	p	ok
254	60 55 50	v	ok	ok	p	p	ok
256	65 60 50	v	ok	ok	ok	ok	ok
258	70 60 50	v	ok	ok	ok	ok	ok
260	75 65 50	v	ok	ok	v	ok	ok
262	80 65 50	v	ok	ok	v	ok	ok
264	85 70 50	v	ok	z	z	ok	v
266	90 70 50	v	ok	z	z	ok	z
268	95 75 50	z	ok	z	z	ok	z

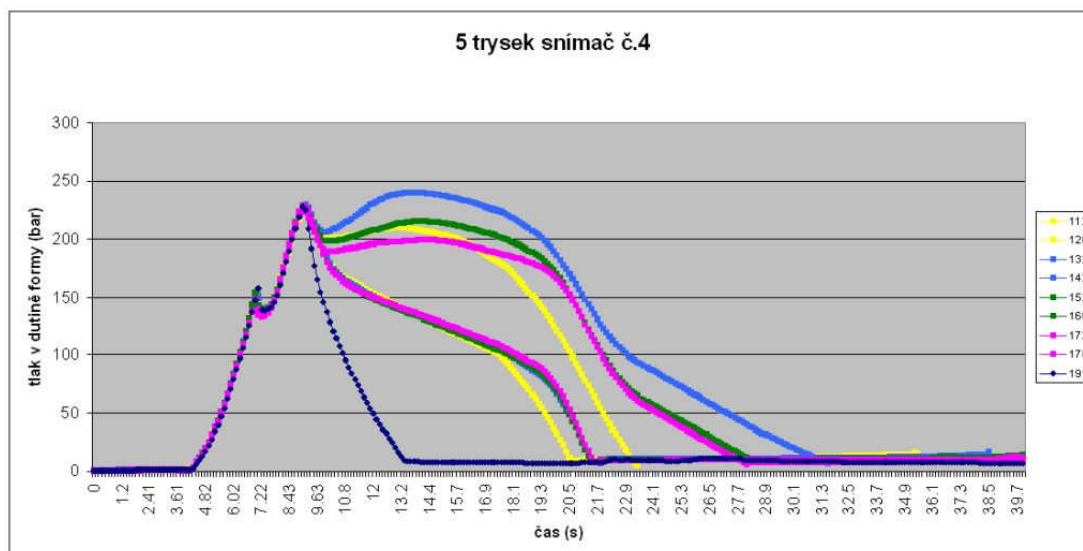
Kvalitativní hodnocení dílů (doba dotlaku 17s) – verze tří uz. trysek

číslo dílu	profil dotlaku	chladič	mřížka	mlhovka	světlo	bok	podběh
270	50 50 45	ok	ok	ok	p	p	ok
272	55 50 50	v	ok	ok	p	p	ok
274	60 55 50	v	ok	ok	p	p	ok
276	65 60 50	v	ok	ok	ok	ok	ok
278	70 60 50	v	ok	ok	ok	ok	ok
280	75 65 50	v	ok	ok	ok	ok	ok
282	80 65 50	z	ok	ok	z	ok	z
284	85 70 50	z	ok	z	z	ok	z
286	90 70 50	z	ok	z	z	ok	z
288	95 75 50	z	ok	z	z	ok	z

PŘÍLOHA 4

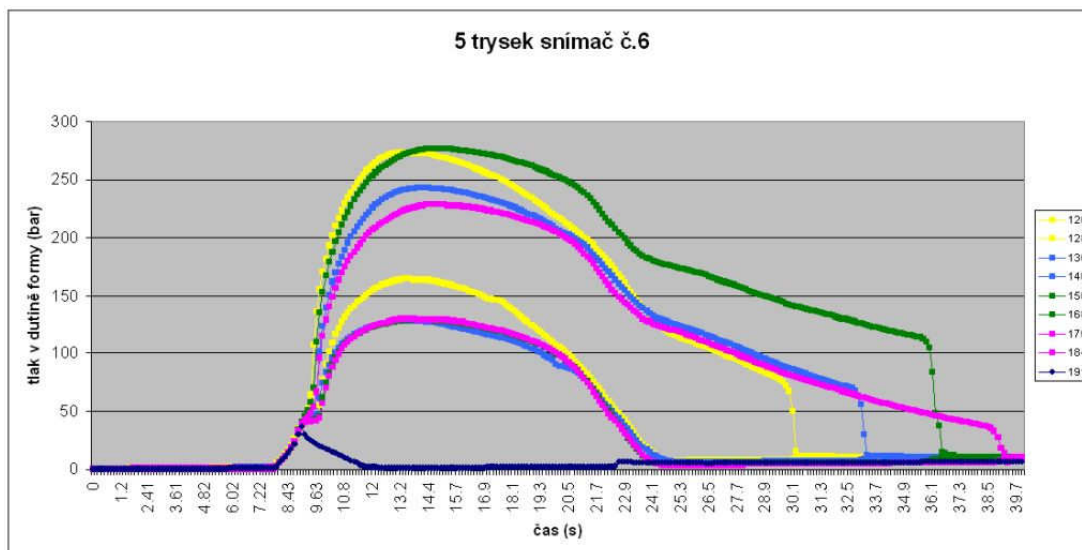


Vybrané tlakové průběhy vymezující oblast bez vad pro tlakový snímač č.1 u varianty pěti uzavíratelných trysek

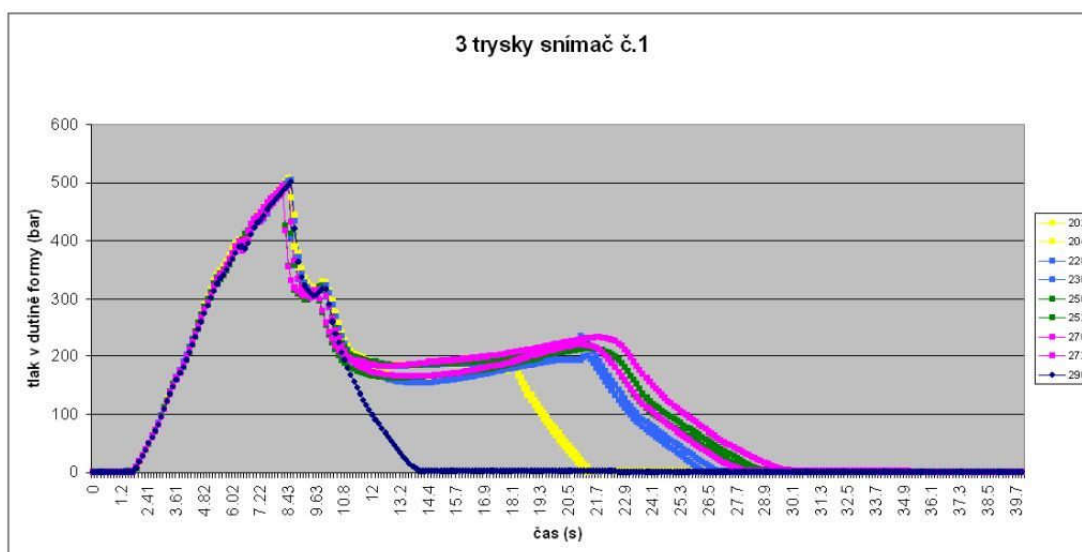


Vybrané tlakové průběhy vymezující oblast bez vad pro tlakový snímač č.4 u varianty pěti uzavíratelných trysek

PŘÍLOHA 4

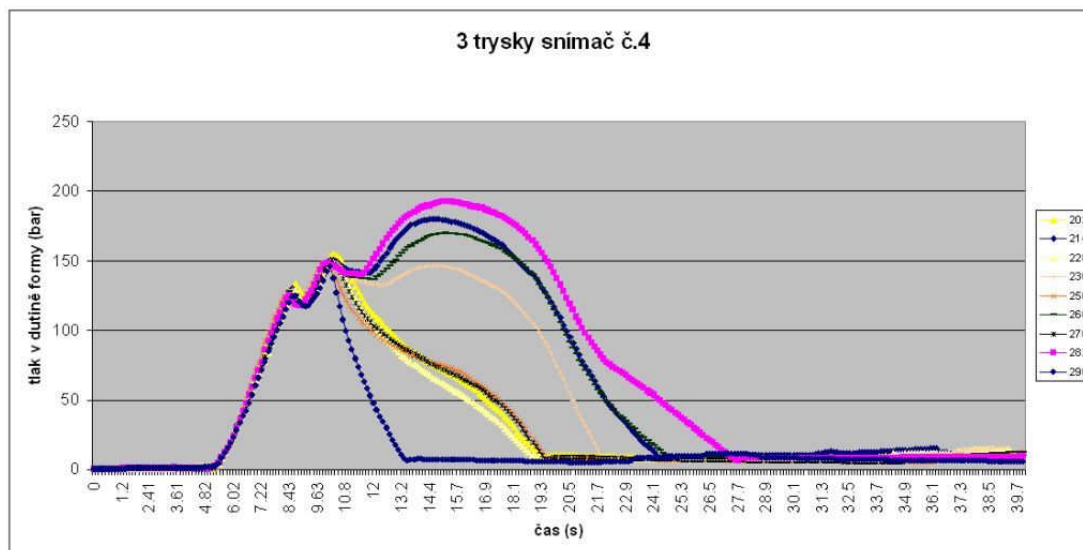


Vybrané tlakové průběhy vymezující oblast bez vad pro tlakový snímač č.6 u varianty pěti uzavíratelných trysek

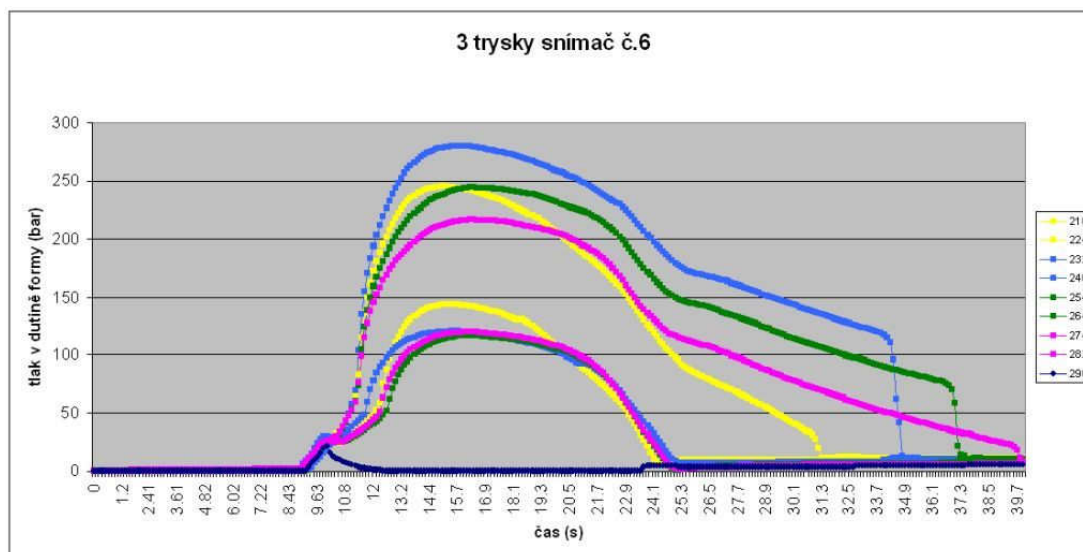


Vybrané tlakové průběhy vymezující oblast bez vad pro tlakový snímač č.1 u varianty tří uzavíratelných trysek

PŘÍLOHA 4

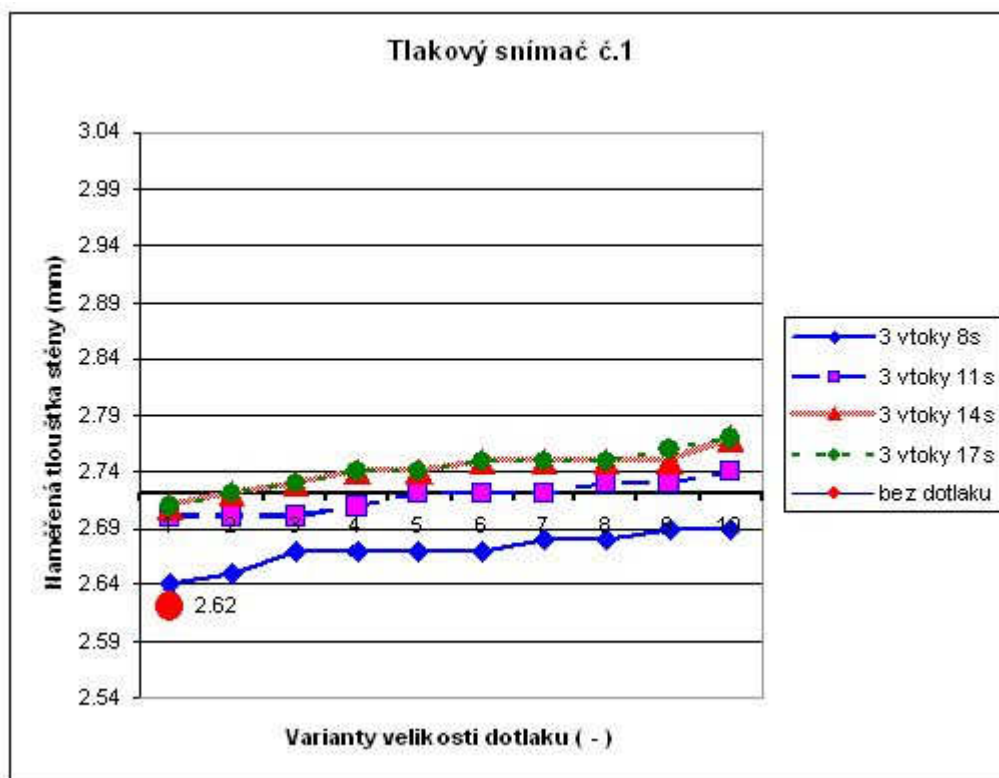


Vybrané tlakové průběhy vymezující oblast bez vad pro tlakový snímač č.4 u varianty tří uzavíratelných trysek

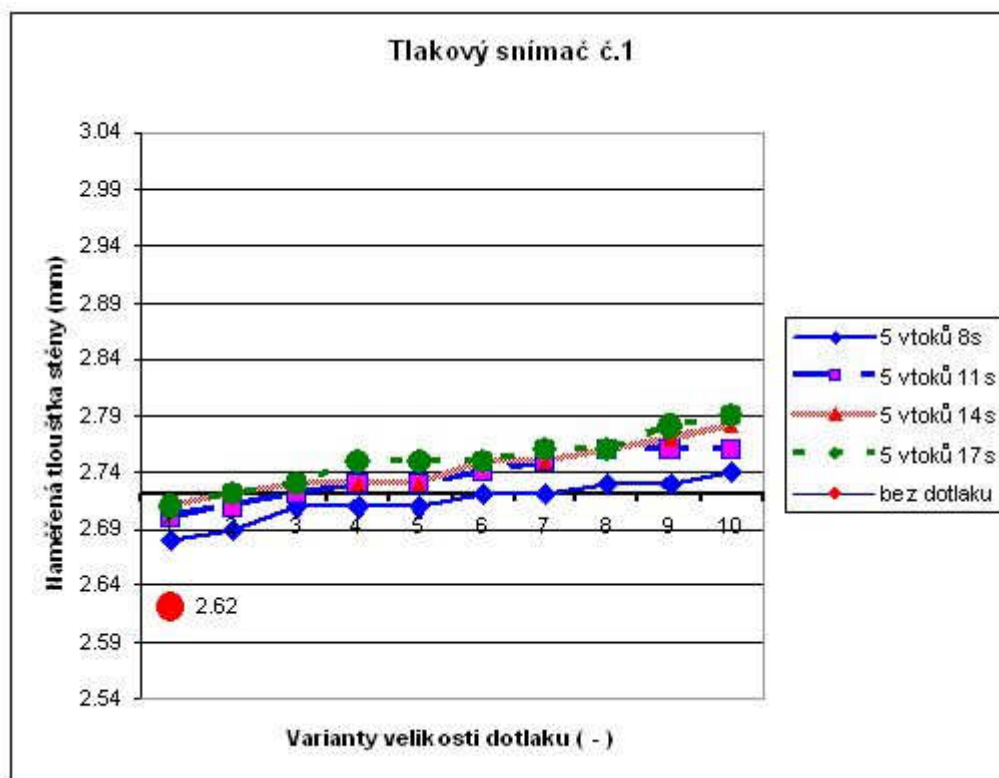


Vybrané tlakové průběhy vymezující oblast bez vad pro tlakový snímač č.6 u varianty tří uzavíratelných trysek

PŘÍLOHA 5

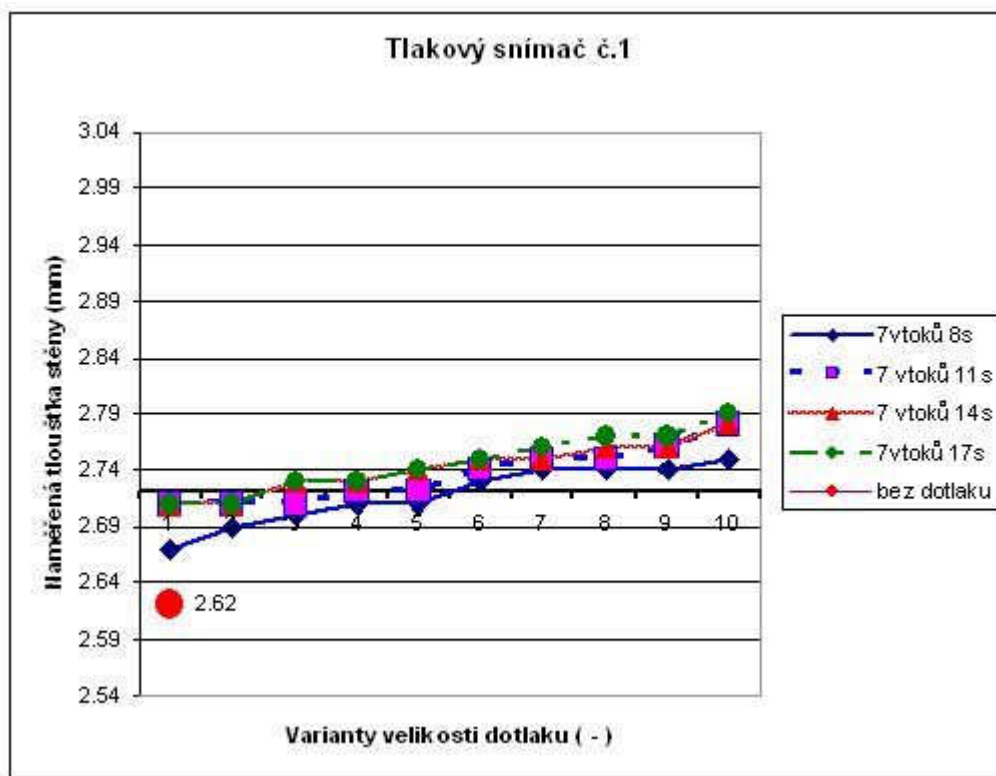


Naměřené tloušťky stěny při použití 3 uz. trysek v oblasti snímače č.1

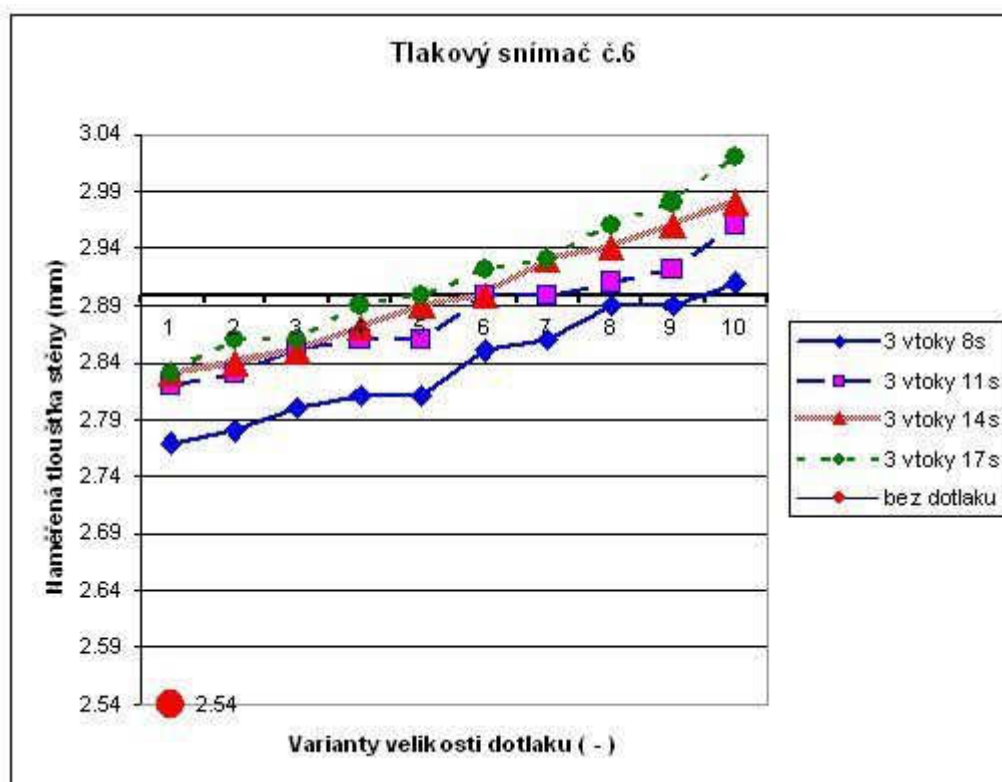


Naměřené tloušťky stěny při použití 5 uz. trysek v oblasti snímače č.1

PŘÍLOHA 5

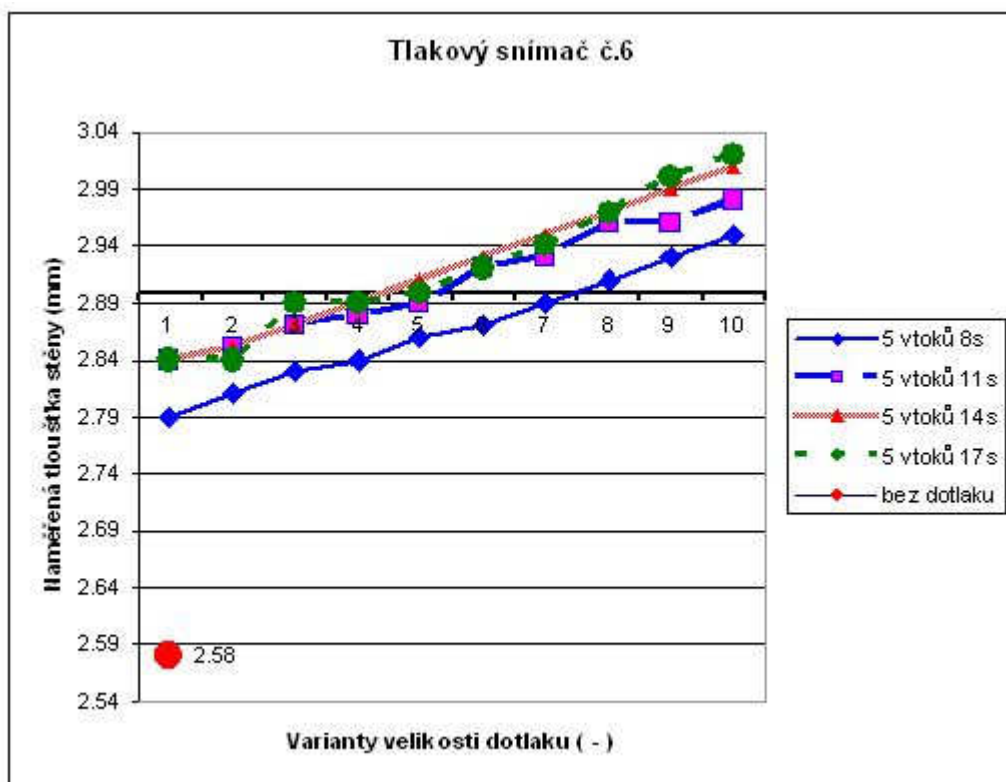


Naměřené tloušťky stěny při použití 7 uz. trysek v oblasti snímače č.1

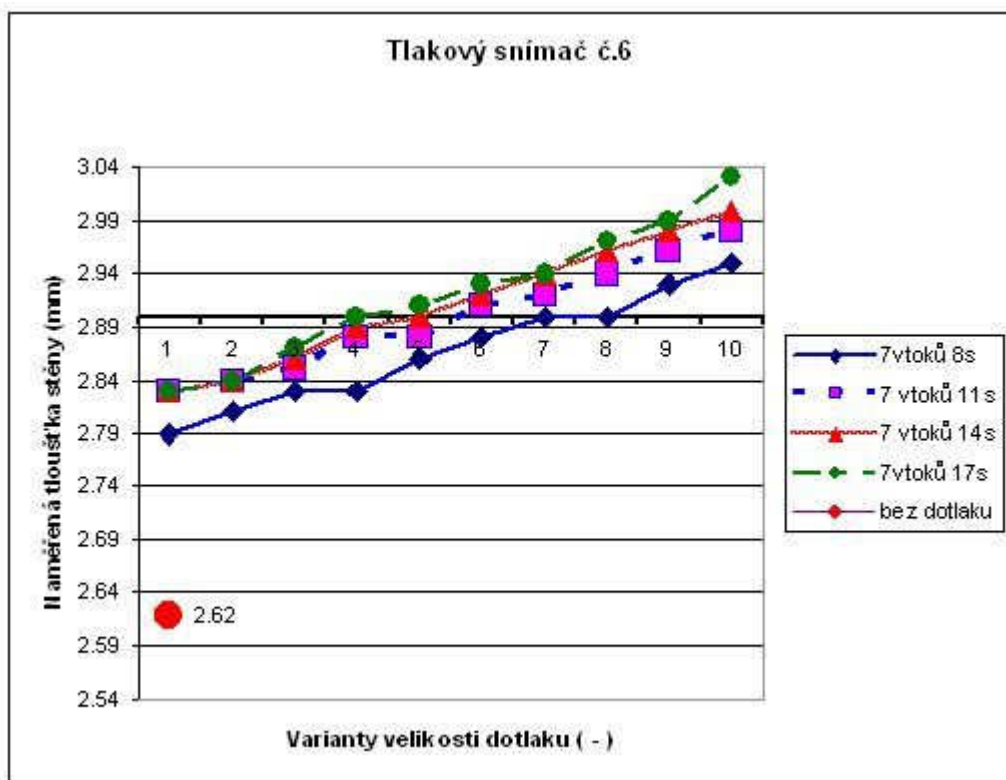


Naměřené tloušťky stěny při použití 3 uz. trysek v oblasti snímače č.6

PŘÍLOHA 5



Naměřené tloušťky stěny při použití 5 uz. trysek v oblasti snímače č.6



Naměřené tloušťky stěny při použití 7 uz. trysek v oblasti snímače č.6

PŘÍLOHA 6

Hmotnosti vyrobených dílů pro analýzu způsobilosti procesu krátkodobou zkoušku

	Způsob přepnutí na dotlakovou fázi	
	od vstřikovacího stroje	pomocí vnitřního tlaku v dutině nástroje
číslo měření	hmotnost dílu (g)	hmotnost dílu (g)
1	3484.0	3493.5
2	3477.0	3487.0
3	3467.0	3495.0
4	3464.0	3503.0
5	3474.0	3491.0
6	3479.0	3495.0
7	3493.0	3489.0
8	3490.0	3479.0
9	3477.0	3491.0
10	3470.0	3490.0
11	3483.0	3477.0
12	3490.0	3492.0
13	3473.0	3494.0
14	3485.0	3482.5
15	3488.0	3475.0
16	3490.0	3482.5
17	3484.0	3490.0
18	3477.0	3493.5
19	3484.0	3482.5
20	3467.0	3491.0
21	3479.0	3495.0
22	3484.0	3489.0
23	3477.0	3493.5
24	3479.0	3482.5
25	3477.0	3493.5
26	3464.0	3490.0
27	3470.0	3482.5
28	3490.0	3491.0
29	3484.0	3489.0
30	3479.0	3500.0
31	3467.0	3482.5
32	3483.0	3490.0
33	3483.0	3491.0
34	3479.0	3489.0
35	3490.0	3482.5
36	3470.0	3494.0
37	3484.0	3493.5
38	3477.0	3490.0
39	3483.0	3491.0
40	3490.0	3495.0
41	3473.0	3493.5
42	3485.0	3487.0
43	3470.0	3489.0
44	3483.0	3495.0
45	3479.0	3474.0
46	3490.0	3478.0
47	3477.0	3482.5
48	3483.0	3494.0
49	3483.0	3491.0
50	3484.0	3482.5

PŘÍLOHA 7

Tabulka průměrných střížných sil pro vybrané vzorky

7 trysek		5 trysek		3 trysky	
Číslo vzorku	ØFmax	Číslo vzorku	ØFmax	Číslo vzorku	ØFmax
	N		N		N
26.-1	5005.2	122-1	5064.1	212-1	4963.1
26.-6	5041.5	122-6	5111.13	212-6	5078.5
28.-1	5115.8	124-1	5007.565	214-1	5019.8
28.-6	5266.2	124-6	5088.023	214-6	5060.1
40-1	5019.4	138-1	5089.48	236-1	4974.2
40-6	5117.9	138-6	5162.158	236-6	5135.6
42-1	4984.1	140-1	4999.835	238-1	5046.2
42-6	5152.5	140-6	5146.565	238-6	5122.1
60-1	5075.2	158-1	4988.485	262-1	5056.2
60-6	5258.1	158-6	5166.595	262-6	5152.3
62-1	5002.7	160-1	4977.203	264-1	4963.9
62-6	5245.7	160-6	5148.318	264-6	5158.9
80-1	5005.3	178-1	4933.335	280-1	4988.8
80-6	5141.6	178-6	5104.368	280-6	5120.6
82-1	5100.9	180-1	5014.488	282-1	5060.1
82-6	5220.1	180-6	5183.713	282-6	5135.6